中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 11 期: 1661 ~ 1682
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题

许清海[①②*], 李曼玥[①], 张生瑞[③④], 张娅红[①②], 张攀攀[①②], 卢静瑶[①②]

① 河北师范大学泥河湾考古研究院, 石家庄 050024;
② 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024;
③ 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;
④ 中国科学院大学, 北京 100049
* E-mail: xuqinghai@mail.hebtu.edu.cn

收稿日期: 2015-05-25; 接受日期: 2015-08-14; 网络版发表日期: 2015-11-02
国家自然科学基金项目(批准号: 41371215)、河北省科技厅科技支撑重点项目(编号: 13277611D)、河北省环境演变与生态建设重点实验室和河北省重点学科基金项目资助

摘要 花粉现代过程是第四纪花粉分析的基础, 对正确解释地层花粉组合, 定量恢复古植被、古气候至关重要. 近年来, 孢粉学者对花粉现代过程开展了很多卓有成效的工作, 取得了长足进展. 本文基于前人研究成果和笔者近几十年对花粉现代过程的探索, 从花粉产量、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及人类活动和土地利用等多个方面进行了综合探讨, 介绍和评述了第四纪花粉现代过程的进展与问题. 通过对比已有研究成果, 笔者认为近几十年来国内外孢粉学者在古气候和古植被定量重建研究中取得了重要进展; 但不同重建方法各有优缺点, 且适用范围不同; 花粉产量、花粉源范围、花粉传播与散布、古气候和古植被重建方法和模型等尚不完善, 都有待改进; 更希望尝试和研发新模型和新方法, 进而获得更可信的古气候和古植被记录. 虽然国外学者较早开展了花粉与人类活动关系研究, 但目前中国在花粉与人类活动和土地利用研究方面处于领先地位, 率先开展了人类活动强度定量重建的尝试, 希望国内相关学者在今后研究中继续予以关注, 以期在地层中定量识别和提取古人类活动信息方面有所突破. 此外, 国内外对花粉沉积过程和花粉保存研究尚显不足, 虽然部分学者就其开展了部分实验和模拟, 但缺乏自然环境条件下花粉沉积和埋藏过程研究, 亟待开展相关工作.

关键词
花粉现代过程
花粉产量
搬运与沉积
花粉保存
花粉-植被-气候
人类活动

认识过去气候和环境变化的规律及其发生机制是预测未来全球变化趋势的关键. 花粉作为最直接、最可信的古气候和古环境代用指标之一, 在正确认识和恢复过去气候和环境变化方面具有不可替代的作用. 利用化石花粉资料定量重建古植被、古气候是孢粉学发展的新趋势, 同时也是21世纪孢粉学面临的艰巨任务和巨大挑战(Davis, 2000; Nakagawa等, 2003; Davis等, 2003; Seppä等, 2004; Sugita, 2007a; 郑卓等, 2008; 许清海等, 2013; Zheng等, 2014).

20世纪80年代以来, 随着统计学和数学方法在古环境研究中的广泛应用, 孢粉学和古生态学家建立了共存分析法、现代类比法、趋势面法、转换函数

中文引用格式: 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
英文引用格式: Xu Q H, Li M Y, Zhang S R, Zhang Y H, Zhang P P, Lu J Y. 2015. Modern pollen processes of China: Progress and Problems (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 58: 1661–1682

法、ERV模型、REVEALS模型和LOVE模型等一系列利用花粉资料定量重建古气候、古植被的方法和模型, 并获得了许多研究成果(Overpeck等, 1985; ter Braak和Juggins, 1993; Sugita, 1994; Prentice等, 1996; Mosbrugger 和 Utescher, 1997; 孙湘君等, 1999; Nakagawa等, 2002; Sugita, 2007a, 2007b; Soepboer和Lotter, 2009; Xu等, 2010a, 2010b; Zheng等, 2014). 然而, 由于花粉与植被和气候之间并非简单的线性关系, 不同方法和模型定量重建的结果存在不和谐现象, 与其他代用指标重建结果也有较多有待商榷的问题(Xu等, 2010b; 秦锋和赵艳, 2013; 郑卓等, 2013). 造成这些不和谐现象的主要原因是花粉现代过程研究不足: 如花粉产量研究方面, 我们还不能正确认识花粉与植被的定量关系, 目前对化石花粉资料的解释仍停留在主观经验的判断, 即花粉数量等同于植被数量, 花粉百分比高的植物类型植被数量多, 花粉百分比低的植物类型植被数量少(许清海等, 2007; 李洁等, 2013); 又如花粉保存问题, 尽管大家都认识到不同沉积环境、不同花粉类型的保存存在明显差异, 但已有研究常常忽略这些差异, 而实际上几乎所有花粉组合都存在一定程度的花粉保存问题(Bunting和Tipping, 2000; Tomescu, 2000); 还如有些植物对气候变化响应敏感, 有些植物演化则滞后于气候变化较长时间, 无疑对利用花粉资料重建古气候产生影响; 再如人类活动对植被和花粉组合的影响, 虽然大家都认识到不能忽视人类活动对植被和环境的影响, 但目前还未找到定量评估人类活动影响的有效方法. 此外, 还有花粉散布、花粉沉积、花粉源范围、花粉与环境等问题, 都会对重建结果带来不确定性.

花粉现代过程研究包括花粉产量、花粉传播、花粉源范围、花粉沉积、花粉保存、花粉与植被、花粉与气候、花粉与人类活动和土地利用等方面(许清海等, 2006). 近年来, 孢粉学者在花粉现代过程研究方面开展了不少卓有成效的工作, 并取得了长足进展(Sugita, 1994; 孙湘君等, 1996; Yu等, 1998; 李宜垠等, 2000; Hicks, 2001; 于革等, 2002; 许清海等, 2004, 2007; Seppä等, 2004; Shen等, 2006; Sugita, 2007a, 2007b; 郑卓等, 2008; Gaillard等, 2010; Lu等, 2011; Li等, 2013; Zheng等, 2014); 但目前仍存在许多问题有待解决. 本文基于前人研究成果和笔者近几十年对花粉现代过程的探索, 论述了第四纪花粉现代过程研究的现状及有待解决的问题, 以期促进花粉现代过程及古植被、古气候定量重建研究的进一步发展.

1 花粉产量

了解不同植物的花粉产量是解决花粉与植被关系的基础. 近年来, 随着花粉沉积散布模型和花粉与植被关系研究的不断深入, 人们对花粉产量的认识和理解也在不断提升, 并逐渐受到众多孢粉学家的重视. 目前花粉产量主要有两种类型: 绝对花粉产量和相对花粉产量.

1.1 绝对花粉产量

绝对花粉产量表示某一植物类型在单位时间、单位面积上贡献的绝对花粉数量(Sjögren等, 2008). 早在1937年, Pohl(1937)就试图通过计算每朵花的花粉粒数估算不同植物的花粉产量, 并得到了部分种属的绝对花粉数量; 但受气候、植被和人为因素影响, 其研究结果不确定性较大, 无法直接应用于孢粉学研究. 20世纪80年代以来, 在花粉监测计划(Pollen Monitoring Programme, PMP)的支持下, 花粉通量与植被盖度数据为绝对花粉产量估算提供了可能(Hicks, 2001; Sugita等, 2010; Filipova-Marinova等, 2010; Mazier等, 2012). 但多年的花粉监测结果显示, 同一地点不同年份花粉通量存在显著的年际变化(Hicks和Birks, 1996; Hicks, 2001; Koff, 2001). 笔者对中国长白山针阔混交林的花粉通量监测也表明: 同一植物的花粉通量年际差异显著, 主要植物类型的花粉产量都存在明显的年际变化(图1).

可靠的花粉通量监测数据是准确估算绝对花粉产量的重要前提(Sugita等, 2010), 但目前用于监测花粉通量的花粉捕捉器保存率较低、丢失严重(动物和人类活动干扰), 获得多年连续的监测数据十分不易, 中国北方不同植被带花粉捕捉器的回收率低于30%, 欧洲的回收率较高也仅50%左右(Xu等, 2009). 因此, 获得全球范围不同植物群落可信连续的花粉沉积率有待更多长期的花粉监测工作.

1.2 相对花粉产量

相对花粉产量的概念最早由Anderson(1970)提出, 他以植物群落和花粉组合中出现频率较高的某

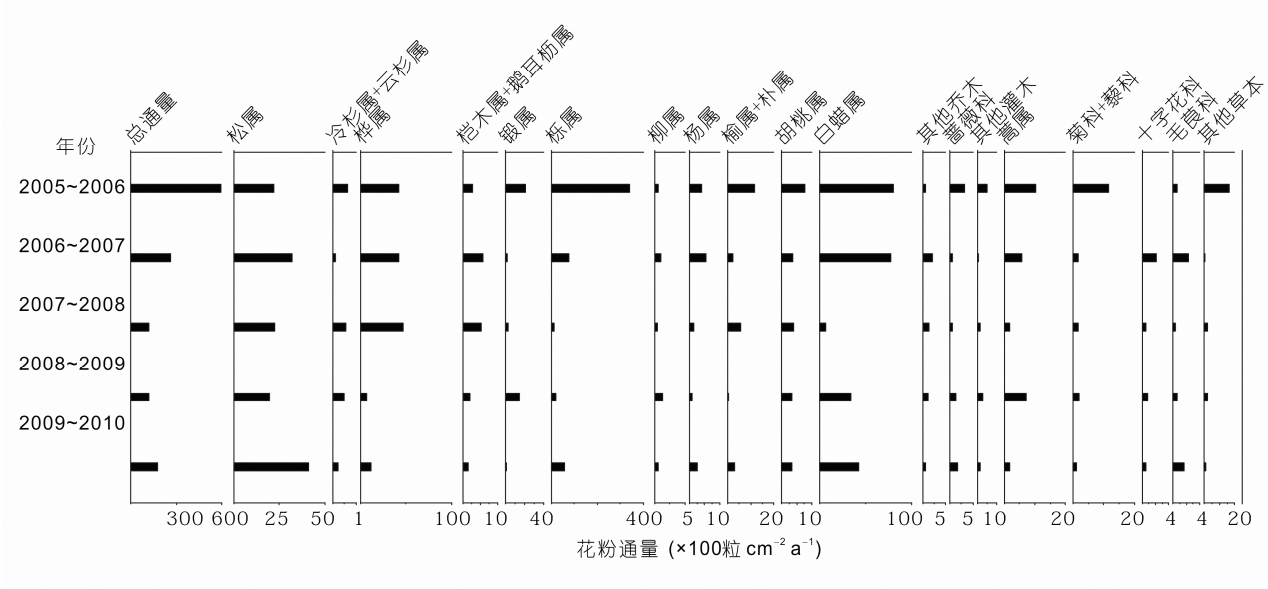


图 1　长白山红松针阔混交林地表(0 m)捕捉器样品花粉通量的年际变化(2005~2010 年)

一类型的花粉生产能力为参考值, 将其他类型的花粉生产能力与之对比, 其比值为相对花粉产量, 为认识花粉与植被的定量关系奠定了基础. 20世纪80年代以来, Parsons等(1981)和Prentice等(1983)在Anderson模型的基础上, 提出了花粉散布和沉积模型(即ERV模型); 随后, Sugita(1993, 1994)对ERV模型进行了完善, 并实现了利用花粉沉降速率和相关花粉源范围估算相对花粉产量, 得到诸多孢粉学家的认可, 并取得了重要进展(Broström等, 2004; Nielsen, 2004; Bunting等, 2005; Soepboer等, 2007, 2008; Räsänen等, 2007; 许清海和张生瑞, 2013).

但相对花粉产量估算研究仍处于起始阶段, 尚有很多问题有待解决. Broström等(2008)总结了欧洲不同研究者估算的几种植物类型的相对花粉产量, 发现同一植物类型, 不同研究者估算的花粉产量差异较大, 这种差异不能确定是由模型假设所致, 还是由不同植被调查方法所致(Bunting和Hjelle, 2010). 笔者对中国北方草原区主要植物类型的相对花粉产量研究发现, 即使同是草原植被, 同样以禾本科花粉为参照种的典型草原与草甸草原的相对花粉产量也存在明显差异(表1). Li等(2015a)关于长白山地区主要乔木类型花粉产量研究结果也显示(表1), 松属和桦属植物具有较高的相对花粉产量值, 而椴属和落叶松属相对较低, 与早期学者关于花粉-植被关系研究和*R*值估算结果相似(许清海等, 2007); 但与欧洲部分研究结果存在明显差异(Sugita等, 1999; Bunting等, 2005).

理论上说, 同一植被类型的相对花粉产量应该一致或相近; 但何以不同地区的相对花粉产量存在差异. 笔者认为, 影响相对花粉产量的因素很多, 可能主要有: (1) 植被调查方法, 以样方植被盖度估算的花粉产量高, 而以样方植被多度估算的花粉产量低(Williams和Shuman, 2008); (2) 研究区植被开放度, 开放地区开花物种较半开放区和森林区多, 花粉产量较高(Herzschuh等, 2006); (3) 土地利用状况, 放牧区花粉产量明显低于刈割区(Fagerlind, 1952); (4) 气候和土壤条件, 不同地区温度、降水和土壤的差异直接影响植物的生长, 进而影响花粉产量; (5) 参照种间花粉产量的差异, 多数研究区采用禾本科为参考种, 禾本科种类很多, 不同属种的花粉产量差异很大, 如芦苇具10~40 cm的圆锥状花序, 而针茅草的花序仅有10 cm长(中国科学院植物研究所, 1983), 同为禾本科植物, 二者之间花粉产量的差异显而易见; 这可能是为何同样以禾本科花粉为参照种的典型草原与草甸草原相对花粉产量也存在明显差异的主要原因之一.

2　花粉散布搬运和花粉源范围

一株植物或一个植物群落的花粉到底能传播和搬运多远, 或者说某一沉积盆地的花粉组合究竟代

表 1　中国北方典型草原区、草甸草原区和森林区主要植物类型相对花粉产量估算结果

研究区域	植被类型	植物种类	相对花粉产量值	估计偏差	参考文献
内蒙古 锡林浩特周边	典型草原	蒿属	11.21	0.31	许清海等, 2013
		藜科	6.74	0.79	
		菊科	0.39	0.16	
		莎草科	0.94	0.08	
		禾本科	1.00	0.00	
		唐松草属	3.06	0.42	
内蒙古 乌拉盖草原区	草甸草原	蒿属	5.66	0.52	未发表资料
		藜科	30.35	4.96	
		菊科	11.62	0.58	
		莎草科	19.78	0.22	
		禾本科	1.00	0.00	
		唐松草属	4.23	0.69	
吉林 长白山地区	温带针阔混交林	栎属	1.00	0.00	Li等, 2015a
		松属	5.19	0.07	
		桦属	3.80	0.35	
		胡桃属	2.00	0.37	
		椴属	0.00	0.16	
		榆属	2.08	0.38	
		落叶松属	0.58	0.07	
		白蜡属	1.16	0.23	

表什么样的植被组成? 花粉组合中的花粉有多少来自当地和周围植被? 多少由远处搬运而来? 都无疑对地层孢粉资料解译具有重要影响. 因此, 了解花粉的传播、散布和搬运过程及其来源范围, 是准确重建古植被、古气候必须解决的问题之一.

2.1　花粉散布与搬运

2.1.1　风力散布

风力搬运是花粉传播的主要途径之一. 风力传播花粉的距离与花粉自身大小、结构、比重以及风力强度有关. 有些花粉可以散布得很远, 甚至到离植物母体上千公里的地方, 如具气囊的松属、云杉属等花粉类型可以被大气环流搬运至北极地区; 有些类型如锦葵科、亚麻科花粉通常只散布到植物体周围几米或几十米范围内(Erdtman, 1969; Fredskild和Wagner, 1974; 王开发和王宪曾, 1983; McAndrews, 1984; Knaap, 1987; Johansen和Hafsten, 1988; Rousseau等, 2003; 戴璐和翁成郁, 2010). 黄土高原洛川和浑源捕捉器花粉研究表明, 在1 m s^{-1}风速条件下, 花粉源范围为0.2~1.5 km, 3.3 m s^{-1}风速条件下为30~100 km, 当风速升至12.5 m s^{-1}, 花粉源范围达到200~1000 km (李月丛等, 2014), 表明风速是影响花粉搬运散布的主要因素.

有学者认为, 花粉散布过程可能存在跨越式分布, 并不是距母体植物越远, 沉积的花粉数量越少(Tauber, 1965; Janssen, 1966); 但并不是所有学者都支持这一论点(Wright, 1967). 花粉散布是否存在跨越式分布? 如果存在, 受什么作用影响? 都需要深入研究. 河北平原除城镇人工种植的观赏松树外, 无松林生长. 但河北平原表土中含有较多松属花粉, 显然这些松属花粉是从西部太行山和北部燕山山地的松林传播而来. 但松属花粉的分布并不是随远离山区距离的增加而逐渐减少, 而是在平原中部出现增高现象(图2; 庞瑞洺等(2010)). 据研究, 太行山中段每年平均发生焚风18天, 最多达49天, 主要集中在冬春季(赵世林等, 1993). 焚风效应的增温区(116°E附近)恰是松属花粉含量的增高区; 据此, 笔者认为受太行山前较强焚风效应的影响, 使松属花粉在河北平原产生跨越式分布.

2.1.2　河水搬运

河水携带花粉是花粉搬运、散布的另一种重要方式. 植物开花后, 花粉随风飘落在植物体周围或被风吹到他处, 成为表土花粉, 表土花粉遇到降水形成的地面片流, 便会被流水带到河流中, 成为冲积物花粉. 河水搬运花粉与风力搬运花粉有着完全不同的

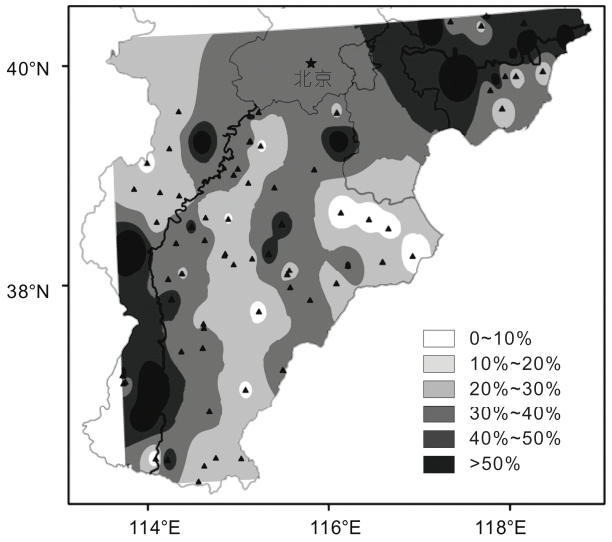


图 2　河北省中南部地区松属花粉百分比空间分布图

粗黑线以西和以北为山区, 以东和以南为平原区; 引自庞瑞洺等(2010)

过程与机理. 冲积物花粉搬运过程中存在均匀、再搬运及分选作用, 虽然风力搬运过程中也存在均匀、再搬运和分选作用, 但河流搬运过程中这些作用更明显(Fall, 1987; Xu等, 1996).

国际学术界关于冲积物花粉存在着一些争议, 争论的焦点是花粉在河水中是否存在分选作用等, Fall(1987)认为冲积物花粉作为沉积颗粒被河水搬运, 搬运过程中经历了明显的均匀和分选作用, 不能反映冲积物源区的植被特征, 因此, 利用冲积物花粉恢复古植被、古气候是不可信的. Hall(1989)则认为冲积物花粉虽作为沉积颗粒被搬运, 但由于花粉比重明显低于沙质碎屑, 在河水中多以悬移质存在, 分选作用不明显, 依据冲积物花粉恢复古植被、古气候是可信的. 水槽实验表明, 花粉在低流速中会发生不同的分选作用, 而当流速达0.3 m s^{-1}以上, 分选作用不明显(Brush G S和Brush L M, 1972). 中国西部干旱区石羊河流域冲积物孢粉研究表明, 河水搬运上游孢粉对流域中下游河床冲积物孢粉谱的贡献非常大(朱艳等, 2004). 笔者对中国滦河流域13个水文站不同时期(枯水期、洪水期、平水期)新鲜冲积物样品的花粉分析表明: 冲积物花粉组合受流域内植物花期影响, 枯水期木本植物花粉含量高于草本植物, 对应春季多数乔木植物花期; 平水期草本植物花粉含量高于木本植物, 对应夏、秋季多数草本植物花期; 洪水期草本植物花粉含量略高于木本植物, 洪水期冲积物中的木本植物花粉主要是由雨水片流将春季落入表土中的花粉带入河水中所致(许清海等, 1995; Xu等, 1996). 冲积物花粉反映的是取样点上游的植被面貌, 而非取样点周围植被特征(许清海等, 1995; Xu等, 1996; Brown等, 2007). 因此, 冲积物花粉适合于流域范围较小的古植被重建; 流域范围较大的冲积物花粉, 来源范围复杂.

但对利用冲积物花粉定量重建古植被、古气候影响最大的还是冲积物花粉的再沉积、再搬运过程和不同沉积相花粉组合的差异, 而且相变因素对河流沉积物花粉组合的影响远大于气候因素. 受河流侵蚀搬运作用影响, 早全新世沉积的花粉有可能再搬运沉积到中全新世地层, 或早、中全新世沉积的花粉再搬运沉积到晚全新世地层, 我们却无法区分哪些是早、中全新世沉积的花粉, 哪些是晚全新世沉积的花粉. 此外, 较大河流往往包含有众多支流, 不同支流的降雨和流量输出均存在明显差异, 这无疑对河流相沉积物花粉源区的解释产生影响. 笔者对华北平原黄河、滹沱河和滦河不同沉积相花粉组合研究表明, 不同沉积相花粉组合存在明显差异, 甚至行洪期和落洪期花粉组合也存在差异(Xu等, 1996). 因此, 在利用河流中下游冲积物花粉组合解释古植被、古环境时应考虑河水搬运花粉的影响.

2.2　花粉源范围

2.2.1　花粉源范围的定义

20世纪60年代, Tauber(1965)首先提出了花粉来源范围的概念, 随后Prentice等(1983, 1987)和根据大气微粒物质扩散模型(Sutton, 1953; Chamberlain, 1975), 建立了ERV模型、Bog模型, 提出了特征花粉源范围(*X*% pollen source area或characteristic pollen source area, CPSA)的概念, 用Pollen Loading百分比(*X*% PL)指示的范围表示沉积盆地主要花粉类型的来源范围(Prentice, 1985; Prentice等, 1987); 考虑到植被分布对花粉组合的影响, Sugita(1994)又提出了相关花粉源范围(relevant source area of pollen, RSAP)的概念, 表示与沉积盆地花粉相关最密切的植被范围, 进一步提高了花粉组合解译和古植被定量重建的可信度, 并得到了广泛应用(Nielsen和Sugita, 2005; Bunting等, 2005; Bunting和Hielle, 2010; Wang和

Herzschuh, 2011).

根据Prentice和Sugita等对花粉源范围的解释, 笔者认为存在两个花粉源范围的概念(图3). 一个是广义花粉源范围(normal source area of pollen, NSAP), 另一个是相关花粉源范围(relevant source area of pollen, RSAP). 广义花粉源范围(NSAP)即输入某一沉积盆地主要花粉的来源范围, 可以理解为沉积盆地主要花粉类型含量随距离增加不再明显上升时的距离(Prentice, 1985, 1988; Sugita, 1993; Xu等, 2012); 相关花粉源范围(RSAP)为某一沉积盆地花粉类型与周围植被对应关系无明显提升的距离, 即ERV模型中最大似然函数得分值(likelihood function scores)无明显变化的距离(Sugita, 1994; Sugita等, 1999; Nielsen和Sugita, 2005). 广义花粉源范围(NSAP)代表沉积盆地主要花粉的来源范围; 相关花粉源范围(RSAP)则表示与沉积盆地花粉组合相关最密切的植被范围(许清海和张生瑞, 2013).

2.2.2 花粉源范围对沉积盆地花粉组合的影响

沉积盆地花粉组合代表多大范围的植被信息, 不同学者观点不同. 有学者认为沉积盆地花粉组合主要反映沉积盆地周围的植被变化(Jackson和Wong, 1994); 有学者认为可以反映数十公里范围内的植被变化(Webb, 1974; Webb等, 1981; Schwartz, 1989); Jacobson等(1981)则认为花粉组合反映的植被信息受沉积盆地半径的影响, 较小的沉积盆地通常代表当地植被变化, 而较大的沉积盆地则反映区域植被的信息. Janssen(1966)将沉积盆地的花粉划分为当地花粉、当地外花粉和区域花粉3部分; Jacobson等(1981)在Janssen研究的基础上讨论了当地花粉、当地外花粉和区域花粉与沉积盆地半径的关系; Prentice(1985)则根据花粉沉降速率大小将沉积盆地花粉组成划分为当地花粉、当地外花粉、区域花粉和区域外花粉4个部分, 并探讨了其与周围植被的对应关系.

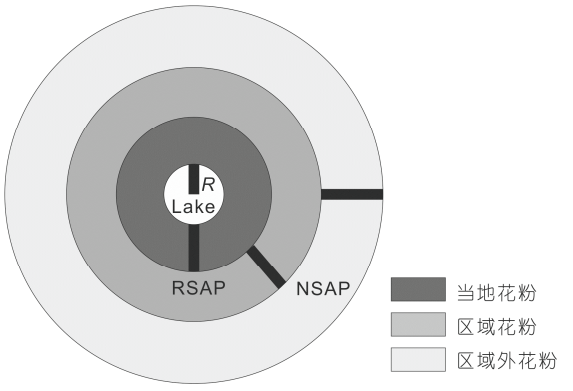


图 3 当地花粉、区域花粉和区域外花粉的花粉源范围

Lake 表示沉积湖盆, *R* 表示湖盆半径, RSAP 表示相关花粉源范围, NSAP 表示广义花粉源范围. 引自许清海和张生瑞, 2013

根据花粉源范围的定义和概念, 笔者认为将沉积盆地花粉划分为当地花粉、区域花粉和区域外花粉3部分比较合理(图3; 许清海和张生瑞, 2013). 当地花粉指相关花粉源范围内的花粉, 主要为沉积盆地周围植被所产生的花粉. 虽然受风力作用的影响, 沉积盆地周围植被的花粉会有一部分加入到区域花粉中或进入高空气流, 但绝大部分花粉还是沉积在植物母体周围, 这也是花粉能成为古环境代用指标的基础. 因此, 当地花粉是沉积盆地周围植被的真实反映(Sugita等, 1999; Nielsen和Sugita, 2005). 区域花粉指广义花粉源范围内除去当地花粉的部分, 主要指风力搬运的花粉, 风速越小, 其来源范围越小, 风速越大, 来源范围越大; 一般认为其与当地花粉反映区域植被的基本信息(Tauber, 1965; Prentice, 1985). 广义花粉源范围以外的花粉, 笔者认为是区域外花粉, 一般传播距离较远, 主要指通过高空气流传播的花粉, 其对沉积盆地花粉组合影响较小, 也不反映区域和当地植被组成.

2.2.3 有河流注入湖泊的花粉源范围

上述花粉来源范围划分方案仅考虑了风力搬运对花粉沉积的贡献, 未考虑水动力搬运花粉的影响. 而现实中(特别在中国), 多数湖泊均有河流注入, 仅考虑风力搬运的影响显然不能解释有河流注入湖泊的花粉源范围. 笔者认为, 有河流注入湖泊(尤其是大型湖泊)的花粉组成除上述3部分外(当地花粉, 区域花粉和区域外花粉), 还应包括河流携带搬运的部分. 可用以下公式来表示:

$$L=A+Wo+Wr,$$

其中, L是河流注入湖泊的花粉; A是空气搬运的花粉; Wo是空气搬运花粉来源范围内片流搬运的花粉; Wr是河流搬运的花粉.

笔者对中国白洋淀地区花粉源范围研究表明, 白洋淀风力搬运的花粉源范围为100 km, 河流搬运

的花粉源范围为所有入湖河流的流域范围(图4; Xu等, 2012). 由于河水搬运花粉能力较强, 只有流速<0.3 m s^{-1}情况下花粉才会沉积下来; 因此, 大多数情况下入湖河流的流域范围即为河流搬运花粉的来源范围. 如果入湖河流的流域范围小于或等于风力搬运花粉的范围(即区域花粉源范围), 湖泊花粉沉积能够较好地反映区域植被和区域气候变化; 如果入湖河的流域范围大于风力搬运花粉的范围, 特别是数倍于风力搬运花粉的范围, 其花粉可能来源于不同植被带和不同气候区, 湖泊花粉沉积就不能准确反映区域植被和气候变化特征. 因此, 在利用有河流注入的湖泊花粉解译和恢复古植被、古气候变化时要谨慎.

3　花粉沉积

花粉经过各种方式的传播和搬运, 会在地表、湖泊、沼泽、海洋等环境下沉积下来, 成为研究古植被、古气候、古环境的重要代用指标. 根据来源和搬运过程可将花粉沉积分为两种类型, 一种为原地沉积, 如水生植物花粉和植被覆盖下的表土花粉, 主要反映当地植被类型; 另一种为远距离搬运来的花粉, 反映区域或沉积盆地整个流域不同植被类型的混合. 无论是原地花粉还是风力或水力搬运来的花粉, 其沉积过程都是影响正确解释化石花粉组合的重要因素.

湖泊花粉沉积及其沉积动力是目前花粉沉积研究较为关注的热点问题之一(Davis, 1968; Davis等, 1984; Horrocks和Ogden, 1994; DeBusk, 1997). 有学者认为花粉沉积到湖底前, 湖水对花粉有搅匀作用, 使湖泊内花粉组合比较均一(Davis和Brubaker, 1973; Lynch, 1996; Luly, 1997; DeBusk, 1997). 然而, 事实并非如此, 湖水中花粉在风力、水流等影响下, 会发生再搬运和再沉积过程(孙湘君和吴玉书, 1987).

Davis等(1968, 1973, 1984)对美国Mirror湖和Frains湖表层沉积物花粉分析研究发现, 同一年份春秋两季湖盆水体上下温度的差异会引起湖内水体的流动, 这种流动将湖盆边缘和湖底的沉积物和花粉搅起, 发生再搬运和再沉积过程, 使得湖盆中心沉积物和花粉数量增多, 并将这一现象定义为沉积物的趋中作用(Sedimentation Focusing); 此外, Davis还发现湖水环流对不同类型花粉的影响不同, 沉降速率较快的花粉类型能迅速沉降到湖底, 在湖泊表层沉积较为均匀; 而沉降速率较慢的花粉类型(主要由风力传播而来), 可长时间悬浮于表水层, 易在湖滨附

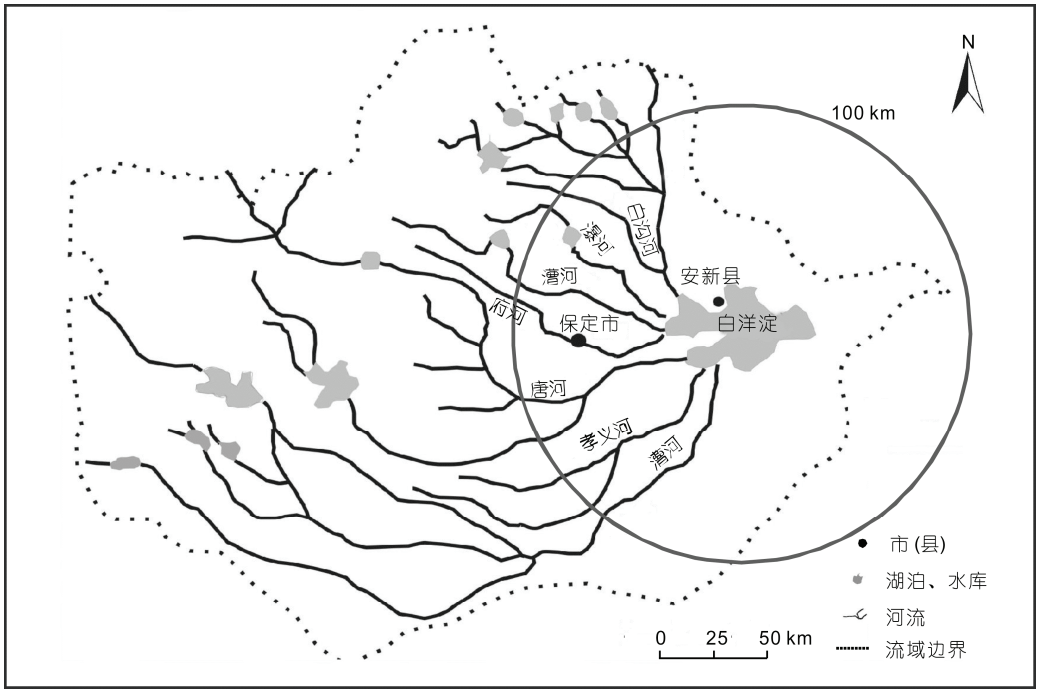


图 4　白洋淀流域水系图及区域花粉源范围

近沉积, 这种优先沉积效应使得本应在湖盆均匀分布的由空气带来的花粉呈现不均匀分布现象(Davis, 1968; Davis和Brubaker, 1973; Davis等, 1984). 但中国新疆博斯腾湖表层沉积物花粉组合研究表明, 花粉在风力搬运过程中发生混合作用, 空间分异较小; 此外, 风力作用产生的湖水流和波浪使得湖泊内花粉组合趋于均一(黄小忠等, 2004) .

中国北方季风气候区4个典型内陆湖泊花粉沉积动力学研究显示, 湖泊内各样点间花粉组合一致性较好, 表明花粉进入湖泊后受到湖水的搅匀作用; 近岸和浅水湖区水动力较强, 沉积物粒度偏粗, 不利于花粉沉积, 花粉浓度较低; 较深的中心区水动力较弱, 沉积物粒度较细, 汇聚作用较强, 花粉浓度较高(图5; 田芳等, 2009). 因此, 利用湖泊花粉恢复古植被、古气候, 取样位置应尽可能选在湖泊的中心位置.

4 花粉保存

花粉不论是沉降到地面还是埋藏在地层中都会受到周围环境的影响和破坏. 一般认为, 花粉的保存

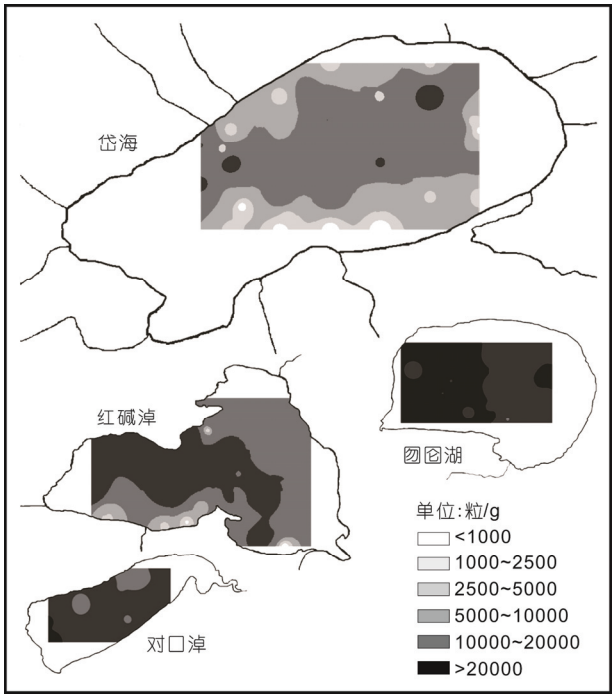


图5 中国北方季风尾闾区4个典型内陆湖泊花粉沉积浓度等值线图

岱海有多条河流注入, 囫囵湖、对口淖和红碱淖只有短小季节性河流注入, 改自田芳等(2009)

能力取决于两方面因素: (1) 自身因素, 如孢粉素含量、花粉的外壁、体积和纹饰类型等(Havinga, 1967); (2) 环境因素, 如氧化作用、土壤的pH值、干湿度变化、有机质含量和微生物作用等.

花粉保存研究主要通过两种方法: 一种是沉积记录的推论, 如Cushing(1967)依据美国明尼苏达州晚第四纪沉积物中花粉的保存状况, 将花粉分为保存完好、破裂、褶皱、蚀变和破碎5个等级. 笔者对青藏高原东北部6个土壤剖面的花粉埋藏学研究发现, 花粉浓度随土壤的pH值升高呈指数形式递减, pH值7.6以上, 花粉浓度迅速降低(许清海等, 2006). 另一种是室内实验研究, Havinga(1964, 1967, 1984)通过实验认为花粉外壁孢粉素含量对花粉保存影响明显, 孢粉素含量越高, 花粉越易于保存, 反之亦然; 外壁薄和外壁光滑的花粉与外壁厚和有纹饰的花粉相比更易被分解掉; 实验室研究还证明, 氧化作用对花粉保存影响明显(Havinga, 1967; Brooks和Elsik, 1974; Twiddle和Bunting, 2010).

不同浓度的NaOH, HCl和$KMnO_4$溶液对几种常见花粉类型进行的实验室保存研究发现, 酸性环境对花粉形态影响相对较小, 碱性和强氧化环境对花粉保存影响较大, 且不同试剂处理时间对花粉保存状况影响显著. 不同种类花粉抗氧化能力存在较大差异: 油菜>荞麦>接骨木>核桃>连翘>侧柏(曹现勇等, 2009; Tian等, 2009). 另外, 温度和湿度波动也会对花粉保存产生重要影响(Holloway, 1989; Campbell, 1991; Campbell和Campell, 1994).

但花粉的石化过程非常复杂, 而实验室保存研究环境条件简单, 其结果无法应用于地层孢粉组合解译. 模拟自然环境条件下花粉保存状况可为花粉保存提供有效参考. 为此, 笔者选取松属、杨属、胡桃属和荞麦属花粉进行自然条件下的花粉保存实验, 结果显示不同自然条件下(埋藏于表土层一年), 保存于针阔混交林土壤中的荞麦属花粉破损率为55%, 保存于裸露岩石缝隙中的荞麦属花粉破损率为91%, 保存于灌草丛土壤中的荞麦属花粉破损率为99.5%(图6). 油松花粉在土壤中埋藏一年后, 花粉数量较埋藏前减少率为11%, 杨树花粉减少率是17%, 胡桃属花粉减少率是37%; 且所有类型均出现不同程度破损. 可见不同花粉类型, 不同沉积环境花粉保存差异明显.

尽管花粉保存对正确解释花粉组合具有重要影响(Bunting和Tipping, 2000; Tomescu, 2000), 但已有

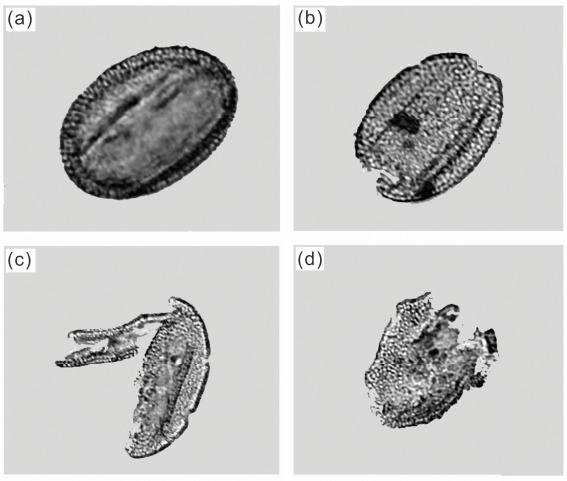


图 6　不同自然埋藏条件下荞麦属花粉保存差异

(a) 未埋藏; (b) 埋藏于油松-胡桃-栎等组成的针阔混交林; (c) 埋藏于裸露岩石缝隙; (d) 埋藏于灌草丛(埋藏时间: 2012-06 至 2013-06)

研究对于花粉保存问题常常忽略不谈, 而实际上几乎所有花粉组合都存在一定程度的花粉保存问题. 因此, 进一步开展自然环境条件下的花粉保存与埋藏过程研究, 是认识和理解花粉保存过程的基础, 也是解译地层花粉组合变化的重要前提.

5　花粉与植被的关系

花粉现代过程研究目的之一是建立花粉与植被的校正系数, 提高古环境分析的准确率和分辨率. 因此, 弄清花粉与植被间的定量关系一直是孢粉学家多年追寻的目标. 孢粉学发展的初期, 对化石花粉的解释多假定花粉数量等同于植被数量, 即花粉百分比高的植物类型植被数量多, 花粉百分比低的植物类型植被数量少(许清海等, 2007). 但某一沉积盆地的孢粉组合并不完全来自当地植被, 其还受区域花粉和外来花粉的影响, 而且花粉组合与周围植被的关系也是非线性的(许清海等, 2006, 2007), 比如孢粉组合中松属花粉含量低于30%不能指示当地有松林存在(李文漪和姚祖驹, 1993; 许清海等, 2007); 以禾本科植物为主的草原植被, 花粉组合也可能以蒿属花粉为主(Liu等, 1999; 李月丛等, 2005).

5.1　花粉与植被的定量关系

20世纪60年代, Davis提出用*R*值来校正花粉与植被的关系, 为定量认识花粉与植被关系开辟了途径(Davis, 1963). 随后, 判别分析, DCA, PCA等分析方法的引入, 进一步帮助孢粉学家认识和了解花粉组合与植物群落的关系(刘鸿雁, 2002; Stutz和Prieto, 2003; Court-Picon等, 2005; Luo等, 2009; Zhang等, 2012). 20世纪80年代以来, Prentice等(1986)认为花粉与植被之间存在“Feaglind”效应, 即花粉与植被间为非线性关系, 并提出了扩展*R*值(ERV)的计算方法, 进一步推动了花粉组合与植被之间相互关系研究; 在此基础上, Sugita等(1994, 1999)提出了相关花粉源范围的概念, 建立了花粉组合与植被相互关系的似然函数, 为定量重建古植被盖度奠定了基础.

自20世纪70年代起, 现代花粉组合与植被关系研究受到重视: 其中Davis等(1973), Peck(1973), Bonny(1978, 1980)等研究了湖泊表层花粉组合与现代植被的相互关系; Hjelle(1997)和Elenga等(2000)建立了表土花粉组合与植被的对应关系; Hicks(2001)和Koff(2001)则通过森林区花粉捕捉器样品, 分析了花粉组合、花粉通量和植被的关系. 20世纪90年代起, 国内学者相继开展了表土花粉与植被间*R*值关系(李文漪和姚祖驹, 1993; 李宜垠等, 2000)、主要花粉类型与植被定量关系(Cour等, 1999; 许清海等, 2007; Zhao等, 2012a)以及表土花粉与植被覆盖度定量估算研究(郑卓等, 2009; Luo等, 2009, 2010)等. 上述成果都在一定程度上促进了花粉和植被关系的研究, 为研究大陆和全球尺度气候环境变化提供了重要基础资料.

湖泊表层花粉、表土花粉和捕捉器花粉是研究花粉与现代植被相互关系的主要载体. 笔者认为, 利用湖泊表层花粉数据进行古植被、古气候分析时, 应首先考虑湖泊的类型: 一般封闭湖泊反映研究区区域植被组成, 湖盆半径越大, 其受区域植被影响也越大; 而有河流注入的湖泊, 其花粉组合受河流搬运作用影响明显, 可能来源于不同植被带和不同气候区, 因此在利用时需要加以区分. 捕捉器花粉一般反映当地植被组成, 且其沉积后不受再搬运和花粉保存差异影响, 能够为花粉-植被关系矫正提供定量指标, 但受花粉产量年际变化的影响, 需要多年观测数据, 才能获得较可信的研究成果. 表土花粉是目前建立花粉组合与植被关系应用最多的数据类型, 但其受沉积环境、生物作用和花粉保存等影响, 且一般代表

多年沉积, 对植被指示略有偏差. 因此, 每种方法都有其优点和不足, 研究时应根据研究内容和研究地的自然地理条件选择不同的研究方法, 以期建立较可信的花粉组合与植被间的定量关系.

5.2 古植被重建

近年来, 利用孢粉资料重建古植被逐渐成为全球变化研究的热点(Prentice等, 1996; Lowe和Walker, 1997; 陈瑜和倪健, 2008; 倪健, 2013). 20世纪80年代起, 欧洲和北美就利用孢粉资料建立了大区域范围植被的时空分布特征, 为理解地带性植被的变化, 建立气候模型和古环境模型奠定了基础(Gaillard等, 1992; Lowe 和 Walker, 1997; Tarasov 等, 2005; Minckley等, 2008). 20世纪80年代末, Liu(1988)曾根据中国北方地区80个样点的地层孢粉, 系统阐述了北方地区第四纪植被演化过程, 并讨论了不同时期不同植被带的迁移规律; 孙湘君等(1999)和于革(1999)则利用孢粉生物群区化法(Biomisation)恢复了中国全新世中期和末次盛冰期的植被分布; Ni等(2010)和Chen等(2010)在前人的工作基础上, 进一步明确了中国主要植被带末次冰期以来的植被带变化规律.

近10年来, 随着表土花粉数据库、植被调查记录和计算机技术的不断完善, 使得利用孢粉资料重建古植被成为可能. 目前使用的植被重建方法主要包括类比法(modern analogue technique, MAT)、生物群区法(BIOME)、景观重建法(landscape reconstruction algorithm, LRA; Sugita, 2007a, 2007b; Soepboer和Lotter, 2009)和多场景重建方法(the multiple scenario approach, MSA; Bunting和Middleton, 2009), 判别函数法(discriminant analysis, DA); 但不同方法重建的植被属性不同: 其中生物群区法和判别分析法主要用于植被类型重建, 类比法可用于植被组合重建, 景观重建算法则侧重于植被盖度重建. 因此, 研究者们应针对不同研究目的选用适合的植被重建方法. 以下是各植被重建方法原理和优缺点.

(1) 类比法: 通过现代和过去花粉组合类比定量模拟古植被(Odgaard, 1999; Odgaard和Rasmussen, 2000). 但由于不同生态类型的植被可能产生类似的孢粉组合, 用来与化石样品进行对比的现代样品可能源于不同生态区, 影响恢复的准确性; 另外, 地层化石花粉组合可能是不同植物群落花粉的混合, 可能找不到与其对应的现代样点.

(2) 生物群区法: 该方法通过对现代和化石花粉资料进行功能型植物组合和优选, 得到植被输出(Prentice等, 1996; Kutzbach等, 1998; 于革, 1999; Ni等, 2010; 倪健, 2013). 但该方法缺点是生物群区分类较粗, 且不考虑花粉的代表性, 因而应用于大区域或全球尺度的花粉-植被关系研究较为有效, 对小尺度和群落水平的植被模拟还存在许多问题或不能使用.

(3) 景观重建算法和多场景重建方法: 是目前利用花粉产量结合化石花粉百分比定量重建过去植被状况的主要方法, 其优点是有望利用主要花粉类型百分比数据定量重建古植被盖度(图7; 许清海等, 2013), 将植被恢复到群落水平; 缺点是模型中将沉积盆地、风速、花粉沉降速率都设为常数(Prentice, 1985; Sugita, 1994), 而现实中上述条件是多变的.

(4) 判别函数法: 该方法是通过比较现代和地层孢粉样品判别函数得分值的相似性, 来判断地层孢粉组合所代表的植被类型(Liu和Lam, 1985; Zhang等, 2013). 其优点在于计算方便、简捷, 中间过程少; 但该方法需要提供与能够反映地层孢粉组合变化的现代表土花粉数据库; 此外, 该方法在运算过程中受主要花粉类型百分比含量影响, 有可能出现部分现代植被类型的花粉组合差异不显著, 导致重建的植被类型变化不明显(Zhang等, 2013).

6 花粉与气候

自孢粉学诞生之日起, 利用花粉数据进行古气候重建便成为孢粉学研究的重要内容之一. 早期孢粉学研究中, 对古气候的研究大多是根据花粉组合中主要类型相对丰度变化定性或半定量的描述气候变化状态(秦锋和赵艳, 2013). 20世纪80年代以来, 随着数学和计算机科学的不断发展, 使得利用花粉资料定量重建古气候成为可能. 最佳类比法(MAT)(Overpeck等, 1985; Guiot, 1990; Nakagawa等, 2002)、转换函数法(WA和WAPLS) (ter Braak和Juggins, 1993; ter Braak, 1995; Seppä等, 2004; Xu等, 2010b; Lu等, 2011)、气候区间法(CAM) (Fauquette等, 1998)、共存因子分析法(CA) (Mosbrugger和Utescher, 1997)和花粉-气候响应面法(PRS)(Birks, 2003)等是目前主要的古气候定量重建方法.

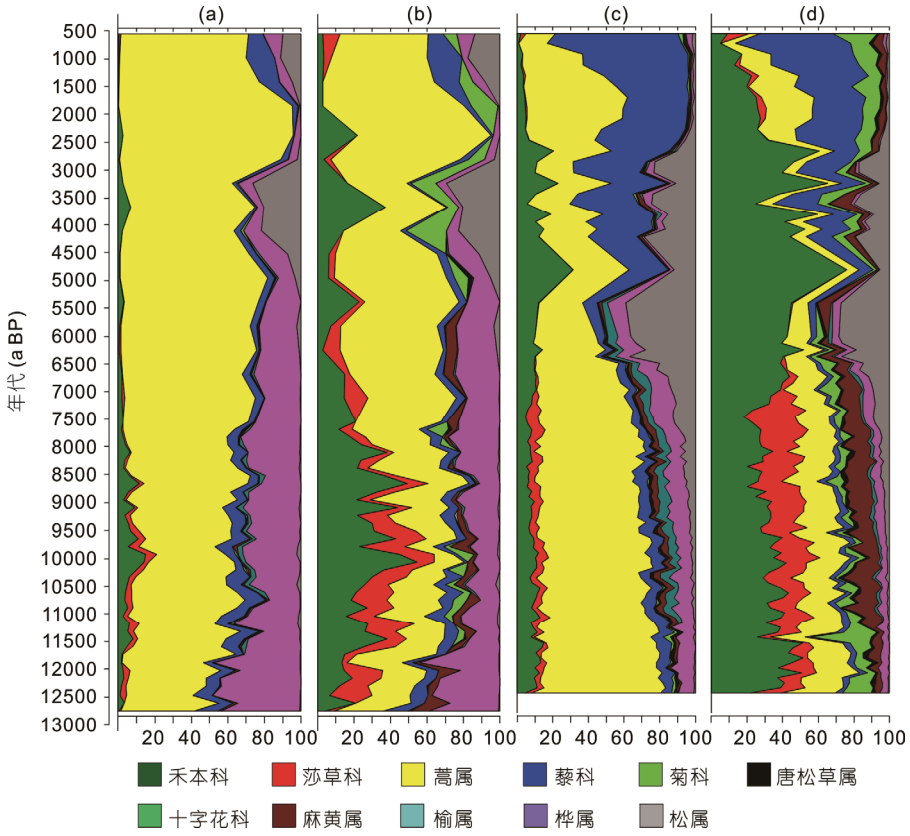


图 7　内蒙古好鲁库湖和巴彦查干湖花粉百分比与重建的植物丰度

引自许清海等(2013). (a)和(b)分别为好鲁库湖的原始花粉百分比和重建的植物丰度; (c)和(d)分别为巴彦查干湖的原始花粉百分比和重建的植物丰度

6.1　花粉与气候的关系

现代花粉数据及其与气候因子相互关系是利用化石花粉资料进行气候重建的基础(郑卓等, 2013). 近年来, 随着全球植被和气候数据库逐渐完善、现代花粉数据的不断建立和补充, 建立了大量综合的现代孢粉数据库(如: 欧洲孢粉数据库、北美孢粉数据库(http://www.ncdc.noaa.gov)、东亚孢粉数据库(http://eapd.sysu.edu.cn/)等)(郑卓等, 2008; Zheng等, 2014); 定量重建的气候指标也在原来温度、降水基础上, 增加了相对湿度、干旱度、蒸发量等(Cour等, 1999; Seppä和Birks, 2001; Seppä等, 2004, 2005; Shen等, 2006; Zhao等, 2009; Lu等, 2011), 进一步提高了孢粉资料定量重建的可靠性和实用性. 自20世纪80年代起, 中国开展了一系列关于花粉和气候的定量关系研究(宋长青等, 1997; 宋长青和孙湘君, 1997; 郑卓等, 2008; Xu等, 2010b; Lu等, 2011; Zheng等, 2014), 并广泛应用于古气候定量重建中(郑卓和Guiot, 1999; Herzschuh等, 2004; Jiang等, 2006; Xu等, 2010b; Wen等, 2013). 但由于表土花粉数据来源广泛, 其沉积类型、实验方法和鉴定标准等均存在明显差异; 此外, 受采样点地理信息记录偏差、不同表土样点气候插值方法和人类活动的影响, 也在一定程度上降低了表土孢粉数据库的可靠性. 因此, 在进行古气候定量重建前, 应该对表土孢粉数据库进行筛选, 严格控制表土孢粉数据库的有效性, 降低古气候定量重建的误差(图8).

6.2　古气候重建方法

由于孢粉埋藏学和植被对气候变化响应滞后等问题, 化石孢粉对古气候信息的推导可能存在一定偏差. 因此, 运用多种方法在同一化石点开展古气候定量重建研究, 并将它们的结果进行对比, 是客观估算古气候变化的有效手段(Xu等, 2010b; 秦锋和赵艳, 2013). 不同重建方法各有优缺点和适用范围, 不同时期不同地区的古气候重建要根据其特殊的气候环境条件选择适宜的方法. 以下是几种最常用的古气

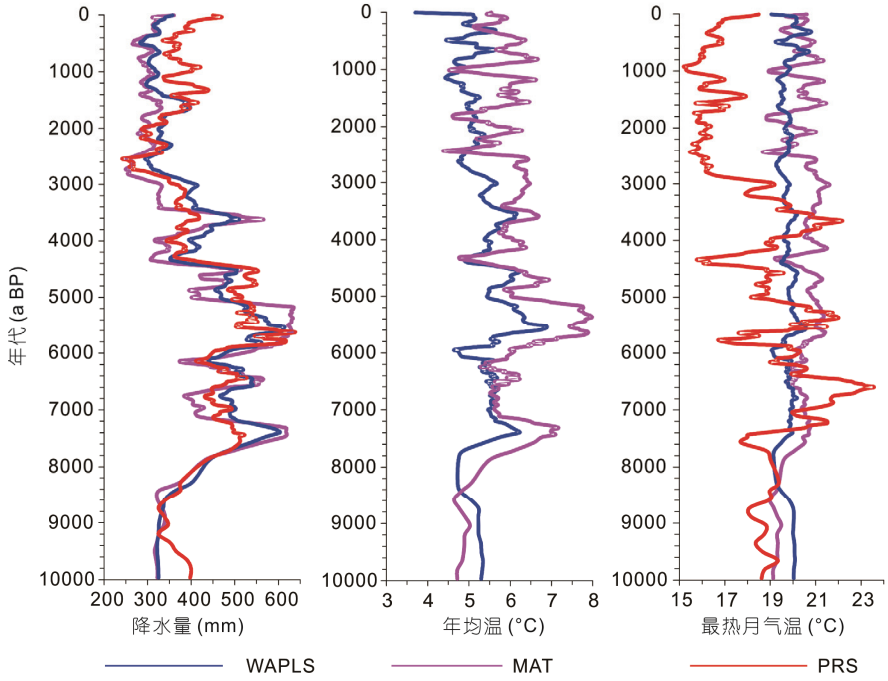


图 8　不同方法(WAPLS, MAT, PRS)定量重建的岱海盆地全新世以来的年均降水量、年均温和最热月气温

引自许清海等(2010b)

候重建方法:

(1) 最佳类比法: 其原理是假设过去植物地理分布与气候的关系与现代一致, 只要地层中某一花粉组合与现代某一个(或某几个)花粉组合相同或相似, 其代表的气候条件就是地层花粉组合的气候条件. 其优点在于该方法直观、简单、中间环节少, 只要有现代花粉数据和现代花粉取样点的气候资料及地层数据即可进行运算(图9; 郑卓等, 2013); 其缺点表现为源自不同气候区不同生态特征的植被有可能产生类似的花粉组合; 或常出现地层花粉组合无现代类比或存在大量现代类比的情况.

(2) 转换函数法: 是指选取代表性花粉类型, 建立它们与现代气候的线性回归, 将化石花粉组合代入回归关系式, 即求得古气候参数. 目前最常用的方法为WAPLS法, 其在利用花粉数据建立转换方程时采用加权平均偏最小二乘法降低了转换方程的边际效应(ter Braak和Juggins, 1993). 其优点表现为考虑到花粉与气候间关系为非线性, 采用花粉组合而不是少数几种花粉类型来建立花粉与气候的关系, 提高了重建结果的可靠性. 但由于建立的函数关系是多个花粉类型最适宜区间的平均值, 模拟结果会比实际变幅小; 此外, 不同区域孢粉-气候转换函数通常存在差异, 有必要建立各自适用的转换函数. 该方法一般较适用于孢粉组合比较单一、主要种类突出且比较一致, 花粉、气候数据比较密集的地区.

(3) 花粉-气候响应面法: 其原理是把花粉丰度在地理空间的分布通过函数转化为气候空间的分布, 用2次或3次趋势面回归分析求出该类花粉分布的最佳条件与极端条件趋势面, 将化石花粉数据与各花粉类型的气候响应面对比, 加权平均求得古气候参数. 其优点在于不必考虑花粉与植被的关系, 能够直观地表示某一花粉类型含量与气候因子的关系; 但该方法重建结果精度较低, 不适用于气候变幅较小地区的古气候重建.

(4) 共存因子分析法: 是以最近现存亲缘类群假说为基础, 假定化石植物与其现生亲缘关系最接近的植物类群对生态环境的适应能力相同或相近, 然后将化石植物群中全部种子植物类群的最近现存亲缘类群现代气候参数适应范围叠加产生共存区间, 共存区间即为化石植物群生存时的气候参数范围(Mosbrugger和Utescher, 1997; 徐景先等, 2000). 该方法只考虑孢粉类群出现与否, 而不考虑其相对丰

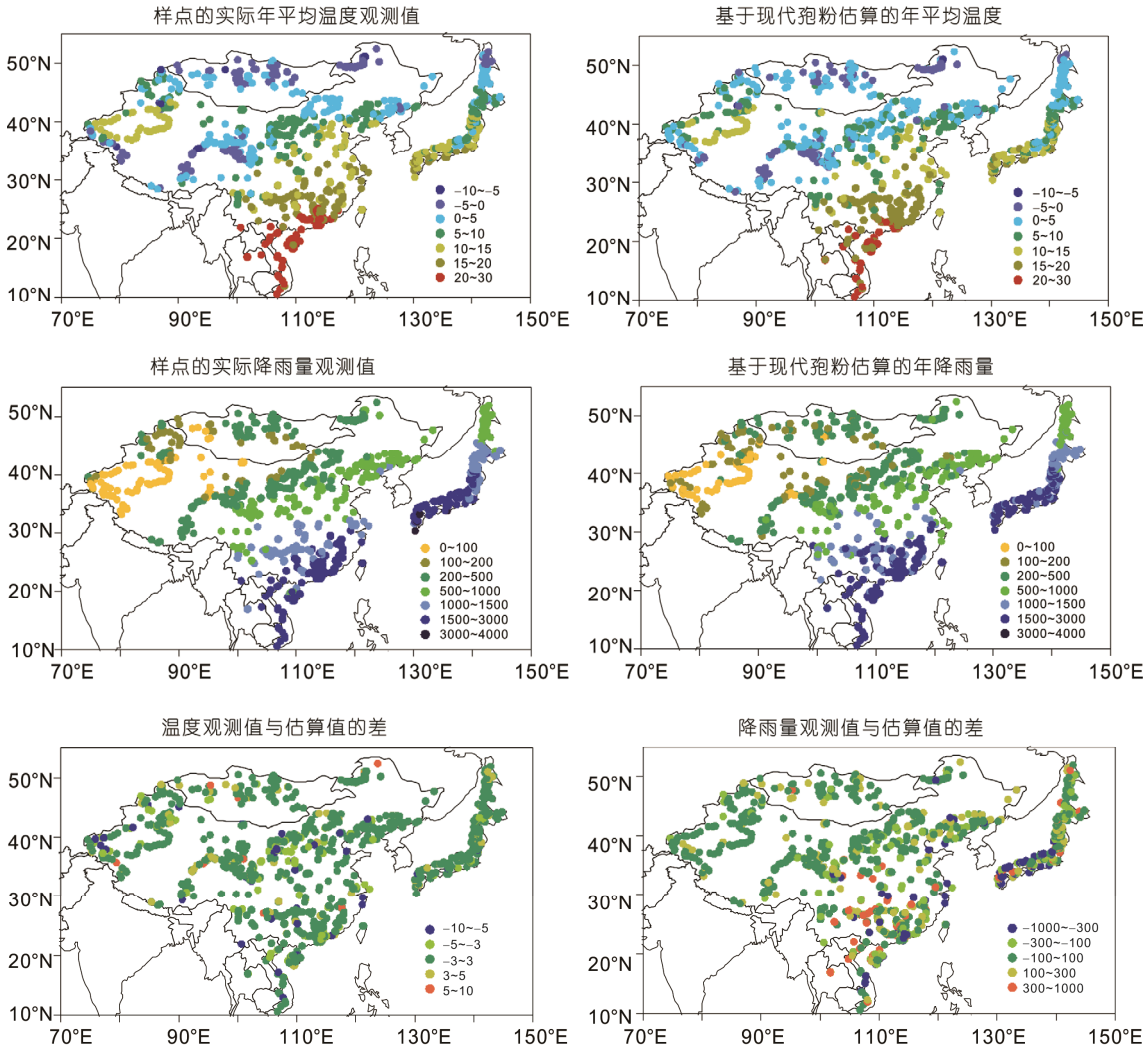


图 9　东亚表土孢粉样点采用最佳类比法重建的年均温(℃)和年降水量(mm)以及与实际观测内插值的空间对比

引自郑卓等(2013)

度的变化; 如果采用的现代植物气候适应数据不准确, 将直接导致古气候重建准确性降低; 孢粉组合所含类群较少时, 且受限于孢粉鉴定大多只能达到科级和属级, 重建的古气候参数范围通常较宽泛, 无法准确指示较小的气候波动.

(5) 花粉比值法: 其原理是通过计算有代表性或生态意义明显的花粉类型比值(El-Moslimany, 1990; 孙湘君等, 1994; 邓韫等, 2002; 许清海等, 2005), 构建现代样品花粉比值与气候因素的函数关系, 然后利用该函数关系来重建区域气候变化(Zhao等, 2012b); 目前最常用的花粉比值有蒿藜比(*Artemisia*/Chenopodiaceae)、松蒿比(*Pinus*/*Artemisia*)等(许清海等, 2005; Zhao等, 2012b). 该方法的优点在于数据易于获取, 且花粉比值本身就可作为古气候指标应用; 其缺点表现为可能存在对应的花粉类型百分比变化差异较大或缺失某种类型, 使得其计算结果呈非线性变化; 不同区域花粉种属及含量不一致, 故需要建立各自比值的函数关系; 此外, 不同花粉比值反映的气候因子不同, 不易于区域数据对比.

7　花粉与人类活动和土地利用

全新世植被的时空变化是自然环境和人类活动交互作用的结果, 特别在近几千年内, 人类活动影响

程度和范围日益扩大, 地表景观变化深刻地记录了人类活动的烙印, 许多科学家提出了“人类世(Anthropocene)”的概念, 以强调人类活动对环境的巨大影响(Crutzen和Stoermer, 2000; 刘东生, 2004). 利用孢粉学研究现代人类活动对植被影响的范围和强度, 是较为准确地认识和理解过去人类活动历史, 并重建和恢复历史时期人类影响下植被变化的基础.

近年来, 许多学者陆续开展了人类活动的孢粉记录研究. 在欧洲, Firbas(1937)和Iversen (1949)是最先将孢粉学应用于人类活动研究的先驱; 随着一些有影响专著的问世(Dimbleby, 1985; Behre, 1986; Birks等, 1988), 与人类活动相关的孢粉记录研究引起了人们日益增多的关注. Kvamme(1988), Hicks (1993), Carpelan等(1995), Hjelle (1999)和Court-Picon等(2005)相继开展了对耕地、狩猎采集地和放牧场等不同文化景观和土地利用单元的孢粉学研究. 随着人类活动孢粉学研究的引入, 国内学者在人类活动的花粉指示类型(Liu等, 2006; 李宜垠等, 2008; Li等, 2015b)、农田-荒地表土花粉组合(杨士雄等, 2010; 庞瑞洺等, 2010; 丁伟等, 2011)和历史时期古人类活动强度重建(Shu等, 2010; Li等, 2012, 2014)等方面也取得较为系统和全面的研究成果.

2008~2012年, 在国家自然科学基金项目的资助下, 笔者开展了《中国人工与人工扰动植被花粉组合特征研究》, 通过对中国不同区域农田内和农田外表土花粉组合的对比分析, 发现中国东北和华南地区农田人工禾本科含量平均高于40%, 西北地区低于20%, 华北地区低于25%, 这种差异可能与区域湿润指数、植被类型和种植方式等有关; 采样点远离农田, 人工禾本科花粉均迅速降低, 区域成分明显增加; 农田花粉浓度明显低于荒地和自然植被, 且植被类型较单一, 人类活动干扰强度越大, 花粉浓度越低, 指示人类活动增强会导致花粉浓度降低. 对华北地区中部不同地貌单元农田花粉组合研究后发现, 由山区向平原, 农田花粉组合中禾本科谷物百分比含量逐渐增加, 但谷物花粉百分比与农田面积百分比的比值逐渐降低(图10), 如山区谷物花粉略高于农田, 比值为1.7∶1; 低山丘陵区谷物花粉与农田相当, 比值为1.03∶1; 平原区谷物花粉远低于农田, 比值为0.4∶1, 指示人类活动强度逐渐增强(Li等, 2013). 历史时期, 农业活动对自然环境依赖性较大, 受自然环境因素及生产力水平制约, 农田周围尚有大量自然

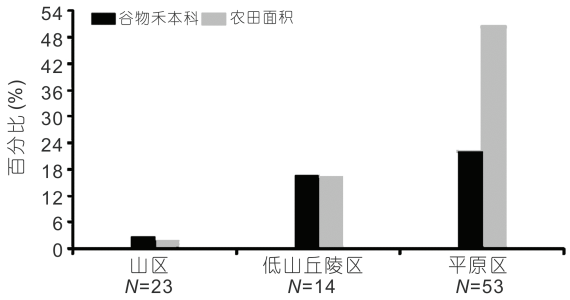


图 10　华北地区中部不同地貌单元(山区、低山丘陵区和平原区)农作物花粉与农田面积百分比的关系

N 表示样品数量(改自 Li 等, 2013)

植被存在. 因此, 笔者认为低山丘陵区人工扰动植被花粉组合特征与历史时期平原区人类清除自然植被从事农业耕作的初始阶段相近, 可能对平原区人类活动初始阶段环境特征具有参考价值.

如何从地层中定量识别和提取人类活动的信息, 一直是困扰科学家的难题. 笔者试图通过现代花粉-植被-土地利用的关系寻求解决这一问题的方法. 河北省西部太行山区小流域内既有自然植被又有人工植被(农田), 河谷内分布着许多当地民众为截留上游汇水用于灌溉农田所建的小水坝, 坝内表层沉积物保存了汇水搬运来的流域花粉, 是研究现代花粉和土地利用关系的理想材料. 笔者选取河北省驼梁和棋盘山两个小流域为研究对象, 通过调查小流域内不同土地利用方式和植被类型, 以及水坝内表层沉积物的花粉分析, 发现禾本科谷物花粉百分比与农田面积百分比呈显著正相关(图11; Li等, 2013), 但这一关系有待更多数据证实. 此外, 在已有工作基础上, Li等(2014, 2015b)还采用WAPLS方法建立了中国自然植被和人工扰动植被表土花粉数据库与人类活动强度指数(human influence index, HII)的定量函数关系, 并尝试进行了地层中古人类活动强度的定量重建(Li等, 2014), 为定量提取人类活动信息提供了现代过程依据.

8　结束语

经过孢粉学者数十年的努力, 生态学、数学、统计学、计算机等领域的融入, 第四纪花粉现代过程研究在大陆尺度表土花粉数据库、花粉产量、花粉源范围、花粉传播与搬运、花粉与植被-气候的关系、古

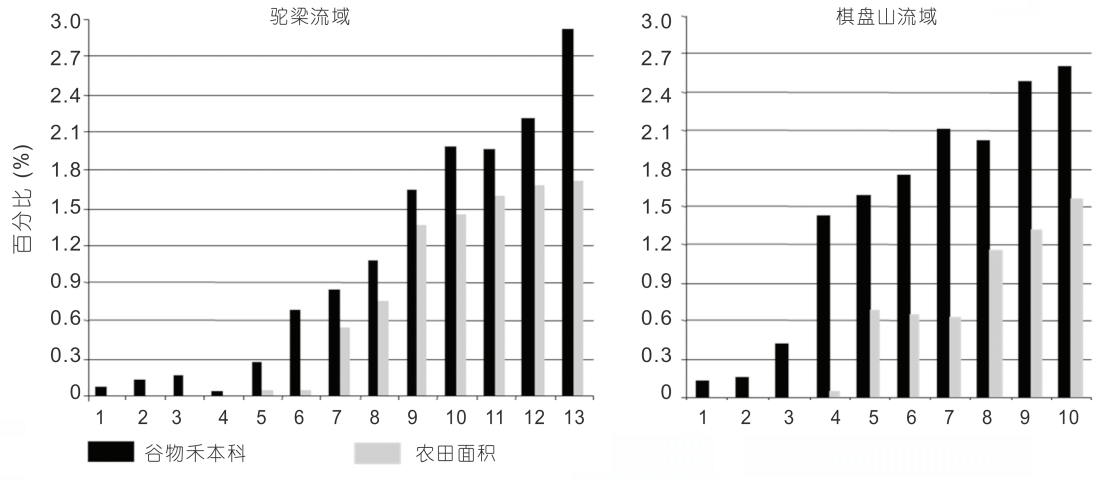


图 11　不同流域谷物禾本科花粉与农田面积百分比

1~13 和 1~10 分别表示驼梁和棋盘山流域自上游至下游采样点位置. 改自 Li 等(2013)

气候和古植被定量重建等方面取得了重要进展: (1) 构建了如最佳类比法、转换函数法和气候区间法等多种古气候定量重建方法, 并在全球范围内得到了广泛应用, 获得了比较可信的古气候记录; (2) 基于详尽的植被调查和表土花粉分析, 建立了花粉源范围、花粉产量和花粉传播与搬运等数学模型, 为定量重建古植被、古气候奠定了理论基础; (3) 利用花粉产量数据和化石花粉资料, 实现了欧洲部分地区大陆尺度的古植被定量重建.

但目前的古气候和古植被重建方法仍存在有待改进的问题: (1) 不同重建方法各有优缺点和适用范围; (2) 花粉产量是利用花粉数据重建植被的基础, 但已有研究显示不同植被区常见植物类型花粉产量存在明显差异, 其影响因素尚不明确; (3) 目前应用的花粉源范围和花粉散布模型只考虑了植被分布与风力作用的影响, 风速变化及其他影响因素未予考虑; (4) 古植被定量重建工作主要集中于欧美地区, 其他地区亟需开展相关工作; (5) 欧洲地区定量重建采用的REVEALS模型是否适合其他地区也需要进一步验证. 此外, 孢粉学者应考虑改进已有的古气候和古植被重建方法和模型, 同时鼓励新方法和新模型的研发和尝试; 以获得更可信的古气候和古植被记录, 为全球和区域古气候模拟和土地覆被变化研究提供重要资料.

在花粉与人类活动和土地利用方面, 国外学者率先开展了不同文化景观和土地利用单元的孢粉组合特征及指示人类活动孢粉类型研究; 在此基础上, 国内实施的人工与人工扰动植被花粉组合特征研究, 在指示人类活动孢粉类型、人为和自然作用影响下的孢粉组合特征和人类活动影响强度等方面取得了重要进展, 处于领先地位. 这对探讨土地覆被变化的影响因素(如人类活动或自然变化等)及其变化过程, 定量认识人类活动对环境的影响具有重要意义. 因此, 国内孢粉学者应继续开展地层中古人类活动信息的定量识别和提取, 以期获得更大突破.

花粉沉积过程和花粉保存差异对正确解释化石花粉组合至关重要; 但已有研究对花粉沉积过程往往解释不清、对花粉保存问题常避而不谈. 虽然国内外学者均较早认识到花粉沉积过程和花粉保存差异对花粉组合的重要影响, 并初步开展了相关研究. 但目前仍停留在实验模拟阶段, 缺乏自然环境条件下的花粉沉积和埋藏过程研究, 无疑制约了花粉现代过程研究的进展, 是国内外亟待开展的研究工作.

相信随着孢粉学者的不懈努力, 认知水平的不断提高, 第四纪花粉现代过程研究定会取得更加瞩目的成果.

致谢　两位审稿专家对文章提出了宝贵意见; 文章撰写过程中与中国科学院地理科学与资源研究所赵艳研究员、德国阿尔弗瑞德-魏格纳极地与海洋研究所曹现勇博士进行了有益讨论; 中山大学郑卓教授、芬兰赫尔辛基大学李建勇博士分别提供了部分数据与图件, 在此一并表示感谢.

参考文献

曹现勇, 田芳, 许清海, 李月丛, 陈利, 白旋. 2009. 氧化环境对油松花粉保存影响实验研究. 冰川冻土, 31: 571–575

陈瑜, 倪健. 2008. 利用孢粉记录定量重建大尺度古植被格局. 植物生态学报, 32: 1201–1212

戴璐, 翁成郁. 2010. 西太平洋海域冬季花粉传播观测及其在东亚季风研究中的意义. 中国科学: 地球科学, 40: 893–902

邓钰, 郑卓, Cour P, 黄赐璇, Duzer D, Calleja M, Roben G, Berne S, Vagnier P. 2002. 中国东部花粉比值与气候的关系及其在定量古气候重建中的应用. 古生物学报, 41: 508–516

丁伟, 庞瑞洺, 许清海, 李月丛, 曹现勇. 2011. 中国东部暖温带低山丘陵区表土花粉对人类活动的指示意义. 科学通报, 56: 839–847

黄小忠, 赵艳, 程波, 陈发虎, 徐俊荣. 2004. 新疆博斯腾湖表层沉积物的孢粉分析. 冰川冻土, 26: 602–609

李洁, 许清海, 张生瑞, 穆会双, 李阳, 李曼玥, 胡亚楠, 梁剑. 2013. 相对花粉产量及其在古植被定量重建中的应用. 第四纪研究, 33: 1101–1110

李文漪, 姚祖驹. 1993. 中国北、中亚热带晚第四纪植被与环境研究. 北京: 海洋出版社. 152

李宜垠, 张新时, 周广胜. 2000. 中国东北样带(NECT)东部森林区的植被与表土花粉的定量关系. 植物学报, 42: 81–88

李宜垠, 周力平, 崔海亭. 2008. 人类活动的孢粉指示体. 科学通报, 53: 991–1002

李月丛, 许清海, 葛亚汶, 李英, 吕素青, 曹现勇, 田芳, 郝利生. 2014. 黄土高原中东部沙尘与非沙尘天气花粉组成及来源范围. 地理研究, 33: 2367–2381

李月丛, 许清海, 阳小兰, 郑振华. 2005. 中国草原区主要群落类型花粉组合特征. 生态学报, 25: 555–564

刘东生. 2004. 开展“人类世”环境研究, 做新时代地学的开拓者——纪念黄汲清先生的地学创新精神. 第四纪研究, 24: 369–378

刘鸿雁. 2002. 第四纪生态学与全球变化. 北京: 科学出版社. 210

倪健. 2013. 孢粉生物群区化与古植被定量重建. 第四纪研究, 33: 1091–1100

庞瑞洺, 许清海, 丁伟, 张生瑞. 2010. 河北省中南部农田孢粉组合特征. 地理学报, 65: 1345–1354

秦锋, 赵艳. 2013. 基于孢粉组合定量重建古气候的方法在中国的运用及思考. 第四纪研究, 33: 1054–1068

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: 2182–2186

宋长青, 孙湘君. 1997. 花粉-气候因子转换函数建立及其对古气候因子定量重建. 植物学报, 39: 554–560

孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 林瑞芬, 卫克勤. 1994. 新疆玛纳斯湖盆周围近14000年以来的古植被古环境. 第四纪研究, 14: 239–248

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(Biome6000). 地球科学进展, 14: 407–411

孙湘君, 王琫瑜, 宋长青. 1996. 中国北方部分科属花粉-气候响应面分析. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 431–436

孙湘君, 吴玉书. 1987. 云南滇池表层沉积物中花粉和藻类的分布规律及数量特征. 海洋地质与第四纪地质, 7: 81–92

田芳, 许清海, 李月丛, 曹现勇, 王学丽, 张丽艳. 2009. 中国北方季风尾闾区不同类型湖泊表层沉积物花粉组合特征. 科学通报, 54: 479–487

王开发, 王宪曾. 1983. 孢粉学概论. 北京: 北京大学出版社. 205

徐景先, 王宇飞, 李承森. 2000. 定量分析第三纪气候与环境的新方法——共存类群生态因子分析法. 见: 李承森, 主编. 植物科学进展(第三卷). 北京: 高等教育出版社. 195–203

许清海, 曹现勇, Tian F, 张生瑞, 李月丛, 李曼玥, 李洁, 刘耀亮, 梁剑. 2013. 中国北方典型草原区花粉产量及其定量重建古植被的作用. 中国科学: 地球科学, 12: 2016–2028

许清海, 李月丛, 李育, 阳小兰, 张振卿, 贾红娟. 2006. 现代花粉过程与第四纪环境研究若干问题讨论. 自然科学进展, 16: 647–656

许清海, 李月丛, 阳小兰, 郑振华. 2005. 中国北方几种主要森林群落表土花粉组合特征研究. 第四纪研究, 25: 585–597

许清海, 李月丛, 阳小兰, 郑振华. 2007. 中国北方几种主要花粉类型与植被定量关系. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 192–205

许清海, 阳小兰, 王子惠, 吴忱, 孟令尧, 姚祖驹. 1995. 河流搬运花粉的初步研究. 植物学报, 37: 829–832

许清海, 阳小兰, 杨振京, 梁文栋, 孙黎明. 2004. 孢粉分析定量重建燕山地区5000年来的气候变化. 地理科学, 24: 339–345

许清海, 张生瑞. 2013. 花粉源范围研究进展. 地球科学进展, 28: 968–975

杨士雄, 郑卓, 黄康有, 王建华, 王晓静, 许清海, 李杰. 2010. 亚热带稻作区表土孢粉研究及其考古学应用. 第四纪研究, 30: 262–272

于革, 刘平妹, 薛滨, 李政益. 2002. 台湾中部和北部山地植被垂直带表土花粉和植被重建. 科学通报, 47: 1663–1666

于革. 1999. 花粉植被化与全球古植被计划研究. 地球科学进展, 14: 306–311

赵世林, 王荣科, 郭彦波, 谭建龙, 石志增. 1993. 太行山中段的焚风. 气象, 19: 3–6

郑卓, Guiot J. 1999. 我国热带地区40万年以来古气候的定量恢复. 中山大学学报(自然科学版), 38: 94–98

郑卓, 黄康有, 魏金辉, 乐远福, 万秋池, 许清海, 吕厚远, 罗运利, 罗传秀, 郑艳伟, 李春海, 杨士雄, 李杰, 潘安定, 邓钰, 魏海成, Beaudouin C, Tarasov P, Nakagawa T, Cheddadi R. 2013. 中国及其邻区现代孢粉数据: 空间分布特征和定量古环境重建中的应用. 第四纪研究, 33: 1037–1053

郑卓, 黄康有, 许清海, 吕厚远, Cheddadi R, 罗运利, Beaudouin C, 罗传秀, 郑艳伟, 李春海, 魏金辉, 杜春彬. 2008. 中国表土花粉与建

群植物地理分布的气候指示性对比. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 701–714
郑卓, 郑艳伟, 黄康有, 魏金辉, 许清海, 吕厚远, 罗运利, 罗传秀, Beaudouin C. 2009. 基于遥感数据对中国表土花粉进行植被覆盖度定量估算的研究. 古生物学报, 48: 228–239
中国科学院植物所. 1983. 中国高等植物图鉴(第五册). 北京: 科学出版社. 1144
朱艳, 程波, 陈发虎, 张家武. 2004. 石羊河流域现代孢粉传播研究. 科学通报, 49: 15–21
Andersen S T. 1970. The relative pollen productivity and pollen representation of north european trees, and correction factors for tree pollen spectra determined by surface pollen analyses from forests. Danmarks Geologiske Undersogelse, Kobenhavn (Ser. II), 96: 1–99
Behre K E. 1986. Anthropogenic Indicators in Pollen Diagram. Rotterdam: Balkema. 232
Birks H H, Birks H J B, Kaland P E, Moe D. 1988. The Cultural Landscape-Past, Present and Future. Cambridge: Cambridge University Press. 521
Birks H J B. 2003. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions from Holocene biological data. In: Mackay A W, Battarbee R W, Birks H J B, Oldfield F, eds. Global Change in the Holocene. London: Hodder Education. 107–123
Bonny A P. 1978. The effect of pollen recruitment processes on pollen distribution over the sediment surface of a small lake in Cumbria. J Ecol, 66: 385–416
Bonny A P. 1980. Seasonal and annual variation over 5 years in contemporary airborne pollen trapped at a Cumbrian lake. J Ecol, 68: 421–441
Brooks J, Elsik W C. 1974. Chemical oxidation (using ozone) of the spore wall of *Lycopodium Clavatum*. Grana, 14: 85–91
Broström A, Nielsen A B, Gaillard M J, Hjelle K, Mazier F, Binney H, Bunting J, Fyfe R, Meltsov V, Poska V, Räsänen S, Soepboer W, von Stedingk H, Suutari H, Sugita S. 2008. Pollen productivity estimates of key European plant taxa for quantitative reconstruction of past vegetation: A review. Veg Hist Archaeobot, 17: 461–478
Broström A, Sugita S, Gaillard M J. 2004. Pollen productivity estimates for the reconstruction of past vegetation cover in the cultural landscape of southern Sweden. Holocene, 14: 368–381
Brown A G, Carpenter R G, Walling D E. 2007. Monitoring fluvial pollen transport, its relationship to catchment vegetation and implications for palaeoenvironmental studies. Rev Palaeobot Palynol, 147: 60–76
Brush G S, Brush L M. 1972. Transport of pollen in a sediment-laden channel: A laboratory study. Am J Sci, 272: 359–381
Bunting M J, Armitage R, Binney H A, Waller M P. 2005. Estimates of 'relative pollen productivity'and 'relevant source area of pollen' for major tree taxa in two Norfolk (UK) woodlands. Holocene, 15: 459–465
Bunting M J, Hjelle K L. 2010. Effect of vegetation data collection strategies on estimates of relevant source area of pollen (RSAP) and relative pollen productivity estimates (relative PPE) for non-arboreal taxa. Veg Hist Archaeobot, 19: 365–374
Bunting M J, Middleton R. 2009. Equifinality and uncertainty in the interpretation of pollen data: The Multiple Scenario Approach to reconstruction of past vegetation mosaics. Holocene, 19: 799–803
Bunting M J, Tipping R. 2000. Sorting dross from data: Possible indicators of post-depositional assemblage biasing in archaeological palynology. Human Ecodynamics. Symp Assoc Environmental Archaeol, 19: 63–68
Campbell I D, Campbell C. 1994. Pollen preservation: Experimental wet-dry cycles in saline and desalinated sediments. Palynology, 18: 5–10
Campbell I D. 1991. Experimental mechanical destruction of pollen grains. Palynology, 15: 29–33
Carpelan C, Hicks S. 1995. Ancient Saami in Finnish Lapland and their impact on the forest vegetation. In: Butlin R, Roberts N, eds. Ecological Relations in Historical Times. Oxford: Blackwell. 195–205
Chamberlain A C. 1975. The movement of particles in plant communities. In: Monteith J L, ed. Vegetation and the Atmosphere 1. New York: Academic Press. 155–203
Chen Y, Ni J, Herzschuh U. 2010. Quantifying modern biomes based on surface pollen data in China. Glob Planet Change, 74: 114–131
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
Court-Picon M, Buttler A, Beaulieu J L. 2005. Modern pollen–vegetation relationships in the Champsaur valley (French Alps) and their potential in the interpretation of fossil pollen records of past cultural landscapes. Rev Palaeobot Palynol, 135: 13–39
Crutzen P J, Stoermer E F. 2000. The "Anthropocene". IGBP Newsletter, 41: 17–18
Cushing E J. 1967. Evidence for differential pollen preservation in late Quaternary sediments in Minnesota. Rev Palaeobot Palynol, 4: 87–101
Davis B A S, Brewer S, Stevenson A C, Guiot J. 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. Quat Sci Rev, 22: 1701–1716
Davis M B, Brubaker M B. 1973. Differential sedimentation of pollen grains in lakes. Limnol Oceanogr, 18: 635–646
Davis M B, Moeller R E, Ford J. 1984. Sediment focusing and pollen influx. In: Haworth Y, Lund J W G, eds. Lake Sediments and

Environmental History. Leicester: University of Leicester Press. 261–293
Davis M B. 1963. On the theory of pollen analysis. Am J Sci, 261: 897–912
Davis M B. 1968. Pollen grains in lake sediments: Redeposition caused by seasonal water circulation. Science, 162: 796–799
Davis M B. 2000. Palynology after Y2K-understanding the source area of pollen in sediments. Annu Rev Earth Planet Sci, 28: 1–18
DeBusk Jr G H. 1997. The distribution of pollen in the surface sediments of Lake Malawi, Africa, and the transport of pollen in large lakes. Rev Palaeobot Palynol, 97: 123–153
Dimbleby G W. 1985. The Palynology of Archaeological Sites. London: Academic Press. 176
Elenga H, Peyron O, Bonnefille R, Jolly D, Cheddadi R, Guiot J, Andrieu V, Bottema S, Buchet G, De Beaulieu J L, Hamilton A C, Maley J, Marchant R, Perez-Obiol R, Reille M, Riollet G, Scott L, Straka H, Taylor D, Van Campo E, Vincens A, Laarif F, Jonson H. 2000. Pollen-based biome reconstruction for southern Europe and Africa 18000 yr BP. J Biogeogr, 27: 621–634
El-Moslimany A P. 1990. Ecological significance of common nonarboreal pollen: Examples from drylands of the Middle East. Rev Palaeobot Palynol, 64: 343–350
Erdtman G. 1969. Handbook of Palynology: Morphology, Taxonomy, Ecology. Copenhagen: Munksgaard. 486
Fagerlind F. 1952. The real signification of pollen diagrams. Bot Notiser, 105: 185–224
Fall P L. 1987. Pollen taphonomy in a canyon stream. Quat Res, 28: 393–406
Fauquette S, Guiot J, Suc J P. 1998. A method for climatic reconstruction of the Mediterranean Pliocene using pollen data. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 144: 183–201
Filipova-Marinova M V, Kvavadze E V, Connor S E, Sjögren P. 2010. Estimating absolute pollen productivity for some European Tertiary-relict taxa. Veg Hist Archaeobot, 19: 351–364
Firbas F. 1937. Der Pollenanalytysche Nachweis des Getreidebaus. Zeitschrift fur Botanik, 31: 447–448
Fredskild B, Wagner P. 1974. Pollen and fragments of plant tissue in core samples from the Greenland Ice Cap. Boreas, 3: 105–108
Gaillard M J, Birks H J B, Emanuelsson U, Berglund B E. 1992. Modern pollen/land-use relationships as an aid in the reconstruction of past land-uses and cultural landscapes: An example from south Sweden. Veg Hist Archaeobot, 1: 3–17
Gaillard M J, Sugita S, Mazier F, Trondman A K, Brostrom A, Hickler T, Kaplan J O, Kjellström E, Kokfelt U, Kunes P, Lemmen C, Miller P, Olofsson J, Poska A, Rundgren M, Smith B, Strandberg G, Fyfe R, Nielsen A B, Alenius T, Balakauskas L, Barnekow L, Birks H J B, Bjune A, Bjorkman L, Giesecke T, Hjelle K, Kalmina L, Kangur M, Vand Der Knaap W O, Koff T, Lageras P, Latalowa M, Leydet M, Lechterbeck J, Lindbladh M, Odgaard B, Peglar S, Segerstrom U, Von Stedingk H, Seppä H. 2010. Holocene land-cover reconstructions for studies on land cover-climate feedbacks. Clim Past, 6: 483–499
Guiot J. 1990. Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 80: 49–69
Hall S A. 1989. Pollen analysis and paleoecology of alluvium. Quat Res, 31: 435–438
Havinga A J. 1964. Investigation into the differential corrosion susceptibility of pollen and spores. Pollen Spores, 6: 621–635
Havinga A J. 1967. Palynology and pollen preservation. Rev Palaeobot Palynol, 2: 81–98
Havinga A J. 1984. A 20-year experimental investigation into the differential corrosion susceptibility of pollen and spores in various soil types. Pollen Spores, 26: 541–558
Herzschuh U, Kürschner H, Battarbee R, Holmes J. 2006. Desert plant pollen production and a 160-year record of vegetation and climate change on the Alashan Plateau, NW China. Veg Hist Archaeobot, 15: 181–190
Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, Hartmann K. 2004. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 211: 1–17
Hicks S, Birks H J B. 1996. Numerical analysis of modern and fossil pollen spectra as a tool for elucidating the nature of fine-scale human activities in boreal areas. Veg Hist Archaeobot, 5: 257–272
Hicks S. 1993. Pollen evidence of localized impact on the vegetation of northernmost Finland by hunter-gatherers. Veg Hist Archaeobot, 2: 137–144
Hicks S. 2001. The use of annual arboreal pollen deposition values for delimiting tree-lines in the landscape and exploring models of pollen dispersal. Rev Palaeobot Palynol, 117: 1–29
Hjelle K L. 1997. Relationships between pollen and plants in human-influenced vegetation types using presence-absence data in western Norway. Rev Palaeobot Palynol, 99: 1–16
Hjelle K L. 1999. Modern pollen assemblages from mown and grazed vegetation types in western Norway. Rev Palaeobot Palynol, 107: 55–81
Holloway R G. 1989. Experimental mechanical pollen degradation and its application to Quaternary age deposits. Texas J Sci, 41: 131–145
Horrocks M, Ogden J. 1994. Modern pollen spectra and vegetation of Mt. Hauhungatahi, central North Island, New Zealand. J Biogeogr, 21:

637–649
Iversen J. 1949. The influence of prehistoric man on vegetation. Danmarks geologiske Undersgelse, Series IV, 3: 1–25
Jackson S T, Wong A. 1994. Using forest patchiness to determine pollen source areas of closed-canopy pollen assemblages. J Ecol, 82: 88–98
Jacobson G L, Bradshaw R H W. 1981. The selection of sites for paleovegetational studies. Quat Res, 16: 80–96
Janssen C R. 1966. Recent pollen spectra from the deciduous and coniferous deciduous forests of Northeastern Minnesota: A study in pollen dispersal. Ecology, 47: 804–825
Jiang W Y, Guo Z T, Sun X J, Wu H B, Chu G Q, Yuan B Y, Hatté C, Guiot J. 2006. Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon. Quat Res, 65: 411–420
Johansen S, Hafsten U. 1988. Airborne pollen and spore registrations at Ny-Ålesund, Svalbard, summer 1986. Polar Res, 6: 11–17
Knaap Van der W O. 1987. Long-distance transported pollen and spores on Spitsbergen and Jan Mayen. Pollen Spores, 24: 449–453
Koff T. 2001. Pollen influx into Tauber traps in Estonia in 1997–1998. Rev Palaeobot Palynology, 117: 53–62
Kutzbach J, Gallimore R, Harrison S, Behling P, Selin R, Laarif F. 1998. Climate and biome simulations for the past 21000 years. Quat Sci Rev, 17: 473–506
Kvamme M. 1988. Pollen analytical studies of mountain summer-farming in western Norway. In: Birks H H, Birks H J B, Kaland P E, Moe D, eds. The Cultural Landscape—Past, Present and Future. Cambridge: Cambridge University Press. 349–367
Li C H, Zheng Y F, Yu S Y, Li Y X, Shen H D. 2012. Understanding the ecological background of rice agriculture on the Ningshao Plain during the Neolithic Age: Pollen evidence from a buried paddy field at the Tianluoshan cultural site. Quat Sci Rev, 35: 131–138
Li J Y, Xu Q H, Gaillard M J, Seppä H, Li Y C, Hun L Y, Li M Y. 2013. Modern pollen and land-use relationships in the Taihang mountains, Hebei province, northern China: A first step towards quantitative reconstruction of human-induced land cover changes. Veg Hist Archaeobot, 22: 463–477
Li J Y, Zhao Y, Xu Q H, Zheng Z, Lu H Y, Luo Y L, Li Y C, Li C H, Seppä H. 2014. Human influence as a potential source of bias in pollen-based quantitative climate reconstructions. Quat Sci Rev, 99: 112–121
Li M Y, Xu Q H, Zhang S R, Li Y C, Ding W, Li J Y. 2015b. Indicator pollen taxa of human-induced and natural vegetation in Northern China. Holocene, 25: 686–701
Li Y Y, Nielsen A B, Zhao X Q, Shan L J, Wang S Z, Wu J, Zhou L P. 2015a. Pollen production estimates (PPEs) and fall speeds for major tree taxa and relevant source areas of pollen (RSAP) in Changbai Mountain, northeastern China. Rev Palaeobot Palynol, 216: 92–100
Liu H Y, Cui H T, Pott R, Speier M. 1999. The surface pollen of the woodland-steppe ecotone in southeastern Inner Mongolia, China. Rev Palaeobot Palynol, 105: 237–250
Liu H Y, Wang Y, Tian Y H, Zhu J L, Wang H Y. 2006. Climatic and anthropogenic control of surface pollen assemblages in East Asian steppes. Rev Palaeobot Palynol, 138: 281–289
Liu K B. 1988. Quaternary history of the temperate forests of China. Quat Sci Rev, 7: 1–20
Liu K B, Lam N S. 1985. Paleovegetational reconstruction based on modern and fossil pollen data: An application of Discriminant Analysis. Ann Assoc Am Geogr, 75: 115–130
Lowe J J, Walker M J C. 1997. Reconstructing Quaternary Environments. 2nd ed. Londres: Longman. 472
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
Luly J G. 1997. Modern pollen dynamics and surficial sedimentary processes at Lake Tyrrell, semi-arid northwestern Victoria, Australia. Rev Palaeobot Palynol, 97: 301–318
Luo C X, Zheng Z, Tarasov P, Nakagawa T, Pan A D, Xu Q H, Lu H Y, Huang K Y. 2010. A potential of pollen-based climate reconstruction using a modern pollen-climate dataset from arid northern and western China. Rev Palaeobot Palynol, 160: 111–125
Luo C X, Zheng Z, Tarasov P, Pan A D, Huang K Y, Beaudouin C, An F Z. 2009. Characteristics of the modern pollen distribution and their relationship to vegetation in the Xinjiang region, northwestern China. Rev Palaeobot Palynol, 153: 282–295
Lynch E A. 1996. The ability of pollen from small lakes and ponds to sense fine-scale vegetation patterns in the Central Rocky Mountains, USA. Rev Palaeobot Palynol, 94: 197–210
Mazier F, Nielsen A B, Broström A, Sugita S, Hicks S. 2012. Signals of tree volume and temperature in a high-resolution record of pollen accumulation rates in northern Finland. J Quat Sci, 27: 564–574
McAndrews J H. 1984. Pollen analysis of the 1973 ice core from Devon Island Glacier, Canada. Quat Res, 22: 68–76
Minckley T A, Bartlein P J, Whitlock C, Shuman B N, Williams J W, Davis O K. 2008. Associations among modern pollen, vegetation, and

climate in western North America. Quat Sci Rev, 27: 1962–1991
Mosbrugger V, Utescher T. 1997. The coexistence approach—A method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 134: 61–86
Nakagawa T, Kitagawa H, Yasuda Y, Tarasov P E, Nishida K, Gotanda K, Sawai Y, Yangtze River Civilization Program Members. 2003. Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the last termination. Science, 299: 688–691
Nakagawa T, Tarasov P E, Nishida K, Gotanda K, Yasuda Y. 2002. Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: Application to surface and Late Quaternary spectra. Quat Sci Rev, 21: 2099–2113
Ni J, Yu G, Harrison S P, Prentice I C. 2010. Palaeovegetation in China during the late Quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 289: 44–61
Nielsen A B, Sugita S. 2005. Estimating relevant source area of pollen for small Danish lakes around AD 1800. Holocene, 15: 1006–1020
Nielsen A B. 2004. Modelling pollen sedimentation in Danish lakes at c. AD 1800: An attempt to validate the POLLSCAPE model. J Biogeogr, 31: 1693–1709
Odgaard B V, Rasmussen P. 2000. Origin and temporal development of macro-scale vegetation patterns in the cultural landscape of Denmark. J Ecol, 88: 733–748
Odgaard B V. 1999. Fossil pollen as a record of past biodiversity. J Biogeogr, 26: 7–17
Overpeck J T, Webb T, Prentice I C. 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: Dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. Quat Res, 23: 87–108
Parsons R W, Prentice I C. 1981. Statistical approaches to *R*-values and the pollen-vegetation relationship. Rev Palaeobot Palynology, 32: 127–152
Peck R M. 1973. Pollen budget studies in a small Yorkshire catchment. In: Birks H J B, West R G, eds. Quaternary Plant Ecology. Oxford: Blackwell. 43–60
Pohl F. 1937. Die Pollenerzeugung der Windbluter. Beihefte zum Botanischen Centralblatt, 56: 365–470
Prentice I C, Berglund B E, Olsson T. 1987. Quantitative forest-composition sensing characteristics of pollen samples from Swedish lakes. Boreas, 16: 43–54
Prentice I C, Guiot J, Huntley B, Jolly D, Cheddadi R. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. Clim Dyn, 12: 185–194
Prentice I C, Parsons R W. 1983. Maximum likelihood linear calibration of pollen spectra in terms of forest composition. Biometrics, 39: 1051–1057
Prentice I C, Webb T. 1986. Pollen percentages, tree abundances and the Fagerlind effect. J Quat Sci, 1:35–43
Prentice I C. 1985. Pollen representation, source area, and basin size: toward a unified theory of pollen analysis. Quat Res, 23: 76–86
Prentice I C. 1988. Records of vegetation in time and space: the principles of pollen analysis. In: Huntley B J, Webb T III, eds. Vegetation History. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 17–42
Räsänen S, Suutari H, Nielsen A B. 2007. A step further towards quantitative reconstruction of past vegetation in Fennoscandian boreal forests: Pollen productivity estimates for six dominant taxa. Rev Palaeobot Palynol, 146: 208–220
Rousseau D D, Duzer D, Cambon G, Jolly D, Poulsen U, Ferrier J, Schevin P, Gros R. 2003. Long distance transport of pollen to Greenland. Geophys Res Lett, 30: 1765
Schwartz M W. 1989. Predicting tree frequencies from pollen frequency: An attempt to validate the *R* value method. New Phytol, 112: 129–143
Seppä H, Birks H J B, Odland A, Poska A, Veski S. 2004. A modern pollen-climate calibration set from northern Europe: developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions. J Biogeogr, 31: 251–267
Seppä H, Birks H J B. 2001. July mean temperature and annual precipitation trends during the Holocene in the Fennoscandian tree-line area: Pollen-based climate reconstructions. Holocene, 11: 527–539
Seppä H, Hammarlund D, Antonsson K. 2005. Low-frequency and high-frequency changes in temperature and effective humidity during the Holocene in south-central Sweden: implications for atmospheric and oceanic forcings of climate. Clim Dyn, 25: 285–297
Shen J, 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
Shu J W, Wang W M, Jiang L P, Takahara H. 2010. Early Neolithic vegetation history, fire regime and human activity at Kuahuqiao, Lower Yangtze River, East China: New and improved insight. Quat Int, 227: 10–21
Sjögren P, Van der Knaap W O, Huusko A, van Leeuwen J F N. 2008. Pollen productivity, dispersal, and correction factors for major tree taxa in the Swiss Alps based on pollen-trap results. Rev Palaeobot Palynol, 152: 200–210

Soepboer W, Lotter A F. 2009. Estimating past vegetation openness using pollen-vegetation relationships: A modelling approach. Rev Palaeobot Palynol, 153: 102–107

Soepboer W, Sugita S, Lotter A F, van Leeuwen J F N, van der Knaap W O. 2007. Pollen productivity estimates for quantitative reconstruction of vegetation cover on the Swiss Plateau. Holocene, 17: 65–77

Soepboer W, Vervoort J M, Sugita S, Lotter A F. 2008. Evaluating Swiss pollen productivity estimates using a simulation approach. Veg Hist Archaeobot, 17: 497–506

Stutz S, Prieto A R. 2003. Modern pollen and vegetation relationships in Mar Chiquita coastal lagoon area, southeastern Pampa grasslands, Argentina. Rev Palaeobot Palynol, 126: 183–195

Sugita S, Gaillard M J, Broström A. 1999. Landscape openness and pollen records: A simulation approach. Holocene, 9: 409–421

Sugita S, Hicks S, Sormunen H. 2010. Absolute pollen productivity and pollen-vegetation relationships in northern Finland. J Quat Sci, 25: 724–736

Sugita S. 1993. A model of pollen source area for an entire lake surface. Quat Res, 39: 239–244

Sugita S. 1994. Pollen representation of vegetation in Quaternary sediments: Theory and method in patchy vegetation. J Ecol, 82: 881–897

Sugita S. 2007a. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: Pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. Holocene, 17: 229–241

Sugita S. 2007b. Theory of quantitative reconstruction of vegetation II: All you need is LOVE. Holocene, 17: 243–257

Sutton O G. 1953. Micrometeorology. New York: McGraw-Hill. 333

Tarasov P, Granoszewski W, Bezrukova E, Brewer S, Nita M, Abzaeva A, Oberhänsli H. 2005. Quantitative reconstruction of the last interglacial vegetation and climate based on the pollen record from Lake Baikal, Russia. Clim Dyn, 25:625–637

Tauber H. 1965. Differential Pollen Dispersion and the Interpretation of Pollen Diagrams: With A Contribution to the InterprEtation of the Elm Fall. Kobenhaven: Reitzels Forlag. 69

ter Braak C J F, Juggins S. 1993. Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): An improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages. Hydrobiologia, 269-270: 485–502

ter Braak C J F. 1995. Non–linear methods for multivariate statistical calibration and their use in palaeoecology: A comparison of inverse (k-nearest neighbours, partial least squares and weighted averaging partial least squares) and classical approaches. Chemometr Intell Lab, 28: 165–180

Tian F, Cao X Y, Xu Q H, Li Y C. 2009. A laboratorial study on influence of alkaline and oxidative environment on preservation of *Pinus tabulaeformis* pollen. Front Earth Sci China, 3: 226–230

Tomescu A M F. 2000. Evaluation of Holocene pollen records from the Romanian Plain. Rev Palaeobot Palynol, 109: 219–233

Twiddle C L, Bunting M J. 2010. Experimental investigations into the preservation of pollen grains: A pilot study of four pollen types. Rev Palaeobot Palynol, 162: 621–630

Wang Y B, Herzschuh U. 2011. Reassessment of Holocene vegetation change on the upper Tibetan Plateau using the pollen-based REVEALS model. Rev Palaeobot Palynol, 168: 31–40

Webb T III, Howe S E, Bradshaw R H W, Heide K M. 1981. Estimating plant abundances from pollen percentages: The use of regression analysis. Rev Palaeobot Palynol, 34: 269–300

Webb T III. 1974. Corresponding patterns of pollen and vegetation in Lower Michigan: A comparison of quantitative data. Ecology. 55: 17–28

Wen R L, Xiao J L, Ma Y Z, Feng Z D, Li Y C, Xu Q H. 2013. Pollen-climate transfer functions intended for temperate eastern Asia. Quat Int, 311: 3–11

Williams J W, Shuman B. 2008. Obtaining accurate and precise environmental reconstructions from the modern analog technique and North American surface pollen dataset. Quat Sci Rev, 27: 669–687

Wright H E. 1967. The use of surface samples in Quaternary pollen analysis. Rev Palaeobot Palynol, 2: 321–330

Xu Q H, Li Y C, Bunting M J, Tian F, Liu J S. 2010b. The effects of training set selection on the relationship between pollen assemblages and climate parameters: Implications for reconstructing past climate. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 289: 123–133.

Xu Q H, Li Y C, Tian F, Cao X Y, Yang X L. 2009. Pollen assemblages of tauber traps and surface soil samples in steppe areas of China and their relationships with vegetation and climate. Rev Palaeobot Palynol, 153: 86–101

Xu Q H, Tian F, Bunting M J, Li Y C, Ding W, Cao X Y, He Z G. 2012. Pollen source areas of lakes with inflowing rivers: modern pollen influx data from Lake Baiyangdian, China. Quat Sci Rev, 37: 81–91

Xu Q H, Yang X L, Wu C, Meng L Y, Wang Z H. 1996. Alluvial pollen on the North China Plain. Quat Res, 46: 270–280

Xu Q H, Xiao J L, Li Y C, Tian F, Nakagawa T. 2010a. Pollen-based quantitative reconstruction of Holocene climate changes in the Daihai Lake

area, Inner Mongolia, China. J Clim, 23: 2856–2868

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

Zhang S R, Xu Q H, Nielsen A B, Chen H, Li Y C, Li M Y, Hun L Y, Li J Y. 2012. Pollen assemblages and their environmental implications in the Qaidam Basin, NW China. Boreas, 41: 602–613

Zhang Y, Kong Z C, Zhang H. 2013. Multivariate analysis of modern and fossil pollen data from the central Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. Clim Change, 120: 945–957

Zhao Y, Li F R, Hou Y T, Sun J H, Zhao W W, Tang Y, Li H. 2012a. Surface pollen and its relationships with modern vegetation and climate on the Loess Plateau and surrounding deserts in China. Rev Palaeobot Palynol, 181: 47–53

Zhao Y, Liu H Y, Li F R, Huang X Z, Sun J H, Zhao W W, Herzschuh U, Tang Y. 2012b. Application and limitations of the *Artemisia*/Chenopodiaceae pollen ratio in arid and semi-arid China. Holocene, 22: 1385–1392

Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, Zhang J W, Yang B. 2009. Vegetation response to Holocene climate change in monsoon-influenced region of China. Earth-Sci Rev, 97: 242–256

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