黄土高原中部落叶栎林花粉组合对植被盖度的定量指示意义

孙沅浩^{1,2}, 张生瑞^{1,2*}, 许清海^{1,2†}, 李怡雯^{1,2}, 沈巍³, 王涛^{1,2}, 周忠泽⁴, 张茹春⁵

1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050024;

2. 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024;

3. 河北师范大学泥河湾考古研究院, 石家庄 050024;

4. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601;

5. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011

* 通讯作者, E-mail: srzhang@mail.hebtu.edu.cn;

† 通讯作者, E-mail: xuqinghai@mail.hebtu.edu.cn

收稿日期: 2018-04-16; 收修改稿日期: 2018-11-12; 接受日期: 2019-01-28; 网络版发表日期: 2019-03-20

国家自然科学基金项目(批准号: 41630753、41702184和41611130050)、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、河北师范大学科研基金项目(编号: L2018B29)和PAGES LandCover6k资助

摘要 基于黄土高原中部黄陵地区34个样点地表苔藓样品的孢粉分析和相应植被调查数据, 阐述了落叶阔叶林顶级群落花粉组合特征及其对植被类型和物种组成的指示意义. 结果显示: 落叶阔叶林顶级群落花粉组合以栎属(42%)、桦属(16%)和松属(12%)等木本类型为主, 不同群落间花粉组合差异较小. 单个样点花粉组合与0~100m范围内植被组成存在一定差异, 但与0~1000m较大空间范围内绝对植被盖度较为相近, 表明表土花粉指示较大区域植被的综合信息, 而不指示样点周围的植被组成. 栎属、桦属和松属花粉含量与植被盖度相近; 海棠(蔷薇科)和槭属等落叶阔叶属种花粉含量较低, 但其对应的区域植被较高; 因此, 解释地层花粉组合时应考虑低代表性花粉类型蕴含的植被信息. 根据获得的主要属种花粉-植被数量关系, 尝试重建了黄土高原东北部公海湖区中全新世(距今7300~5000年)时期的区域植被组成, 该时段湖区应发育以栎属为建群种的落叶阔叶林顶级群落.

关键词 黄土高原, 落叶阔叶林, 顶级群落, 花粉组合, 绝对植被盖度

1 引言

落叶阔叶林是北半球温带和暖温带地带性植被类型之一(Box和Fujiwara, 2015), 在全球生态平衡、气候调节和碳循环等方面具有重要作用(Botkin, 1993; D'Odorico等, 2015). 地层花粉记录显示, 中全新世北

半球中纬度地区曾广泛发育以栎属(*Quercus*)为主的落叶阔叶林(Prentice等, 1991; Williams, 2003; Dyke, 2005; Stebich等, 2015; Xu等, 2017). 研究这一时期落叶阔叶林对气候变化的响应过程及其反馈效应, 对定量评估未来全球变暖背景下北半球中纬度地区陆地生态系统变化具有重要意义.

中文引用格式: 孙沅浩, 张生瑞, 许清海, 李怡雯, 沈巍, 王涛, 周忠泽, 张茹春. 2019. 黄土高原中部落叶栎林花粉组合对植被盖度的定量指示意义. 中国科学: 地球科学, 49: 1004–1013, doi: 10.1360/N072018-00112

英文引用格式: Sun Y, Zhang S, Xu Q, Li Y, Shen W, Wang T, Zhou Z, Zhang R. 2019. Quantitative indicative significance of pollen assemblages on vegetation coverage in deciduous *Quercus* forest in the central Loess Plateau, China. Science China Earth Sciences, 62: 992–1001, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9334-3>

现代花粉组合与植被的量化关系是正确解释地层花粉组合、定量重建区域植被演替历史的基础(许清海等, 2015). 目前为止, 国内外关于落叶阔叶林现代花粉与植被的关系已开展较多研究(Ruffaldi, 1994; Scott Anderson和Koehler, 2003; Yu等, 2004; 许清海等, 2007; López-Sáez等, 2010). 普遍认为, 栎属和桦属(*Betula*)花粉与植被的对应关系相对较好, 对落叶阔叶林指示意义明确(李月丛等, 2005; 许清海等, 2007); 并被广泛应用于区域古气候和古植被重建(Huntley, 1990; Ren和Beug, 2002). 然而, 现有研究样点数量少(李月丛等, 2005; 许清海等, 2007)、缺乏系统详尽的植被调查数据(Anderson和Koehler, 2003; López-Sáez等, 2010); 此外, 受人类活动影响, 中国大部分地区自然植被消失殆尽, 已有研究样点多受人类活动干扰(Yu等, 2004; 许清海等, 2007), 不代表自然状态下花粉-植被的对应关系, 导致现有研究结果存在较大不确定性. 落叶阔叶林植被具有怎样的花粉组合特征? 其对区域植被组成的指示性如何? 解决这些问题, 对揭示全新世时期落叶阔叶林植被演替历史、认识和理解区域植被对未来气候变化的响应方式及区域植被自然恢复等至关重要.

子午岭地处黄土高原腹地, 是中国北方落叶阔叶林典型分布区之一(图1a和1b). 本文选取子午岭中段黄陵国家森林公园为研究区, 基于详细的野外植被调查和地表苔藓样品花粉分析, 旨在阐明落叶阔叶林表土花粉组合特征, 揭示主要花粉类型与植被组成的定量关系; 同时, 结合山西宁武公海地层花粉记录(Xu等, 2017), 恢复中全新世时期黄土高原区典型落叶阔叶林植被状况, 为区域自然植被恢复和历史时期古植被重建提供科学依据.

2 研究区概况

子午岭是黄土高原董志塬和洛川塬之间的基岩山地, 地质构造属陕甘宁向斜拗陷抬升区(陕西师范大学地理系《延安地区地理志》编写组, 1983). 基岩上覆盖新近纪红土(厚80~100m)和第四纪黄土堆积(厚50~100m); 区内海拔1200~1700m, 地面起伏、沟谷深切, 发育典型的梁峁丘陵地貌景观(张平仓和郑粉莉, 1993; 图1c).

研究区属中温带大陆性季风气候, 受东亚季风和大陆性气团交替影响, 四季分明. 年平均气温6~8℃,

最热月均温20~22℃, 最冷月均温-6~7℃; 年降水量600~700mm, 具有明显的季节性, 70%以上集中在7~9月(陕西省气象局区划办公室, 1988).

研究区植被区划属暖温带北部落叶栎林带(张新时, 2007). 区内天然次生林发育, 形成以辽东栎(*Quercus wutaishanica*)为优势种的顶级群落(邹厚远等, 2002; 范玮熠等, 2006), 乔、灌、草层次分明, 郁闭度达70~90%(张平仓和郑粉莉, 1993). 乔木植物以辽东栎、油松(*Pinus tabulaeformis*)和白桦(*Betula platyphylla*)等为主, 并伴生有海棠(*Malus* spp.)、茶条槭(*Acer ginnala*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)和漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等落叶阔叶树种; 灌木类型主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)和鼠李属(*Rhamnus*)等; 林下草本茂密, 主要生长有蒿属(*Artemisia*)、禾本科(*Poaceae*)和莎草科(*Cyperaceae*)等植物属种. 此外, 由于区内海拔相对高差小, 植被垂直分带不明显.

3 材料与方法

3.1 样品采集与植被调查

为避免共线性作用和人为因素干扰对数据结果的影响(Sugita, 1994; Broström等, 2005; Bunting等, 2013), 本研究参考Bunting等(2013)提出的野外工作方法选取样点并开展植被调查. 我们选择子午岭中段黄陵国家森林公园为研究区(80km×40km), 利用ArcGIS 10.2软件生成间距>3km的随机样点50个, 参照Google卫星影像剔除地形陡峻难以开展工作和人类活动干扰较大(道路、农田、村庄等)的样点16个, 最终保留34个样点(图1c).

2017年4~5月, 课题组成员赴研究区开展样品采集和植被调查工作. (1) 样品采集: 利用GPS系统定位随机样点, 选取样点附近(10m范围内)苔藓丰富的位置作为中心点, 采集表层苔藓并详细记录经纬度和海拔高程等信息; 按照中心样点周围(10m内)出现的主要植物属种命名样点群落类型, 划分四个主要类型: 辽东栎群落(18个)、白桦-辽东栎群落(7个)、海棠群落(5个)和茶条槭群落(4个)(图1c). (2) 植被调查: 0~10m植被调查采用1m×1m样方完成, 沿不同方位记录各样方内植被的投影盖度(图2a, 共计21个样方); 10~100m植被调查先借助GPS系统描绘群落边界(图2b), 然后根据

图 1 研究区地理位置及样点分布

(a) 中国北方落叶阔叶林分布区; (b) 红色方框指示研究区域, 红点表示山西宁武公海(Xu等, 2017), 主要植被类型: 1, 针叶林; 2, 阔叶林; 3, 灌木; 4, 草地; 5, 草甸; 6, 农田; 7, 湿地; 8, 水体(改自Ran等, 2012); (c) 采样点及群落分布: A, 辽东栎群落; B, 白桦-辽东栎群落; C, 海棠群落; D, 茶条槭群落; 底图来源: <https://maps.yahoo.com/>

群落开度选用适合的调查方法(详见Bunting等, 2013; 李洁等, 2013), 获得不同群落各植物属种绝对植被盖度 ($\text{m}^2/\text{m}^2 \times 100$); 100~1000m植被调查主要针对100m范围内未出现的群落类型(其他植物群落和道路、河流等), 目测估算主要木本和草本属种的盖度。由于本区域植被组成主要以森林群落为主, 乔、灌、草层次分明, 植被调查过程中详细记录了群落垂直分层中各植物属种的绝对盖度, 以反映植物在群落中的比例和分布。

3.2 实验分析与数据处理

地表苔藓样品花粉提取采用常规的酸碱处理法(Fægri和Iversen, 1989), 每个样品取干重2g左右。花粉鉴定统计在Leica DM5500 B显微镜下进行, 每个样品鉴定统计陆生植物花粉1000粒以上。花粉形态鉴定主要参考《中国植物花粉形态》(王伏雄, 1995)和野外采集的现代植物花粉标本(河北师范大学资源与环境

图2 植被数据调查方法

(a) 0~10m植被调查图示, 红点为中心样点, 蓝点指示样方分布; (b) 0~100m群落边界图(不同颜色代表不同群落类型); (c) 0~1000m Google卫星影像

科学院孢粉实验室)。花粉百分含量以陆生植物孢粉总数为基数计算, 花粉图谱采用Tilia 1.7.16软件绘制(Grimm, 2011)。

野外获取的0~10m和10~100m植被调查数据采用Vegetation Survey Manager 2.0软件(Middleton, 2011)进行处理运算, 获得0~10m和0~100m距离加权绝对植被盖度。100m范围外植被数据通过数字化获得, 在Arc-Map 10.2软件中利用最大似然法分类对下载的Google卫星影像进行数字化和赋值(孙家柄, 2009)(图2c), 为保证各样点100~1000m范围内植物群落赋值的准确性, 赋值数据采用各样点及其周围生境相似的3~4个样点植物群落的属种盖度均值。绝对植被盖度图谱采用Tilia 1.7.16软件绘制。

3.3 主坐标分析

主坐标分析(Principal Co-ordinates Analysis, PCoA)是一种非约束性数据降维方法, 通过计算研究数据的距离矩阵, 获得个体或群组间相似性或差异性的可视化坐标(Gower, 1966)。为探讨黄陵地区现代花粉组合与周围植被组成的对应关系, 本研究选用主坐标分析对花粉数据和不同距离植被数据进行排序; 同时, 对公海地层花粉记录(Xu等, 2017)与黄陵地区现代花粉组合进行排序, 以检验两者的相似性。上述分析在Canoco 5.0软件中实现(Braak和Šmilauer, 2012)。

4 研究结果

4.1 花粉组合特征

研究区34个样点共鉴定出52个科属植物花粉类

型。木本类型32种, 以栎属、桦属和松属(*Pinus*)为主, 其他阔叶类型有榆属(*Ulmus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)和槭属(*Acer*)等; 草本类型17种, 主要为蒿属、莎草科和菊科(*Asteraceae*); 蕨类孢子以单缝孢(*Monoletes spore*)和三缝孢(*Triletes spore*)为主。整体而言, 黄陵地区落叶阔叶林花粉组合以木本类型为主(81%), 其中栎属花粉占绝对优势(42%), 其次为桦属(16%)、松属(12%)和鹅耳枥属(1.5%), 其他花粉类型含量相对较低; 草本类型中蒿属含量相对较高(11%), 莎草科(2.7%)和禾本科(1.3%)常有出现, 其他类型含量极低(图3a)。

4.2 植被组成特征

研究区植被调查数据对比显示, 不同距离植被属种组成和绝对盖度表现出以下特征(图3b~3d): (1) 0~10m植被绝对盖度约为80%, 不同群落植物属种组成存在明显差别, 栎林群落中辽东栎(52%)和蔷薇科(*Rosaceae*, 7%)占绝对优势; 白桦-辽东栎群落主要由白桦(32%)、辽东栎(29%)和蔷薇科(9.1%)组成, 其他属种盖度均低于10%; 海棠群落和茶条槭群落主要由茶条槭(25%)和海棠(22%)等组成, 辽东栎和白桦等极少出现(均低于5%)。 (2) 0~100m植被绝对盖度高达160%, 主要植物属种组成与0~10m植物组成具有相似性; 但各样点间植物组成差异性增大, 而群落间差异性相对减小; 灌木层和草本层植物属种类型和绝对盖度均明显增加。 (3) 0~1000m植被绝对盖度约为150%, 各植物属种绝对植被盖度与100m范围内绝对植被盖度显著不同, 表现出明显的均质性特征; 区域植被仍以辽东栎为主(40%以上), 但栎属绝对植被盖度较100m范围内有所下降, 其他属种如油松和鹅耳枥等绝对盖度

图3 研究区花粉组合及植被组成

A, 辽东栎群落; B, 白桦-辽东栎群落; C, 海棠群落; D, 茶条槭群落

相对增加.

4.3 主坐标分析

主坐标分析选取研究区花粉组合和植被组成中12个主要花粉类型进行运算(出现次数>5次, 平均含量高于2%), 结果显示(图4): (1) 孢粉百分比和0~1000m范围内绝对植被盖度数据点分布均较集中, 表明组内差异性较小; 0~10m和0~100m范围内绝对植被盖度数据点呈离散分布, 表明组内数据点差异性较大. (2) 孢粉百分比和0~1000m范围内绝对植被盖度数据点主要位于第一主轴正方向, 且组间距离相对较小, 而0~10m和0~100m范围内绝对植被盖度数据点分布于第一主轴负方向, 表明研究区花粉组合与0~1000m范围内植被数据关联最密切.

图4 PCoA分析结果

5 讨论

5.1 花粉组合对植被的指示性

风力搬运是花粉传播散布的主要途径之一. 沉积盆地花粉组合不仅包括当地和周围植被产生的花粉, 还受区域或区域外植被组成的影响; 同时, 受地形和气候等因素制约, 不同地区花粉组合代表的植被范围存在明显差别(许清海和张生瑞, 2013). 因此, 明确某一沉积盆地花粉组合指示的植被范围, 对正确解释地层花粉组合和定量重建区域植被演替历史具有重要意义. 然而, 受认知水平限制, 已有花粉-植被对应关系研究的植被调查范围常局限于样点周围(10m²或20m²), 且缺乏系统详尽的植被调查数据(李月丛等, 2005; Djamali等, 2009); 同时, 以往研究多采用相对植被数据来探讨花粉-植被对应关系(Davis和Goodlett, 1960; Andersen, 1970; 许英勤等, 1996; 许清海等, 2007), 但现实中植物群落多存在分层现象、具有明显的垂直结构特征, 尤其在森林群落和灌丛群落中表现更为显著(吴征镒, 1980).

为获得黄陵地区落叶阔叶林表土花粉组合准确可信的植被指示意义, 本研究选取花粉百分比、样点周围(0~10m、0~100m)和区域(0~1000m)绝对植被盖度数据进行对比分析(图3b~3d); 一方面降低了由于区域植被数据缺失而产生的不确定性, 另一方面去除了不同植物属种比例相互制约的影响. 结果显示: (1) 研究区各样点0~10m和0~100m范围内绝对植被盖度具有

明显差异, 表现为局部群落特征, 植被组成与花粉组合变化存在较大差别, 部分样点0~100m范围内并无栎属、桦属或松属等植物生长, 但对应样点花粉组合却有一定比例的花粉存在, 表明研究区花粉组合受100m之外植被组成的影响较大. (2) 研究区0~1000m绝对植被盖度样点间差异极小, 表明研究区植被组成在区域尺度上趋于均质化, 所有样点花粉组合也表现出相似的特征; 同时, 主坐标分析也显示, 研究区花粉组合与0~1000m绝对植被盖度关系最为密切(图4). 据此, 我们认为黄陵地区落叶阔叶林表土花粉组合主要指示区域(0~1000m)植被组成, 不代表样点周围(0~10m或0~100m)植被变化.

5.2 主要花粉类型与植被对应关系及其应用

黄陵地区落叶阔叶林0~1000m植被组成显示, 研究区栎属植物为主要建群种, 其次为海棠(蔷薇科)、槭属、松属和桦属; 研究区花粉百分比也表现出以栎属、桦属和松属为主的组合特征, 但蔷薇科和槭属含量较低; 表明不同植物属种花粉-植被对应关系存在明显差异(图3). 然而, 已有研究多关注栎属、桦属和松属等花粉含量较高的木本类型, 对蔷薇科和槭属等类型论述不足(姚祖驹, 1989; 李月丛等, 2005); 同时, 在地层孢粉组合解释中也多关注松属、栎属和桦属等类型含量变化, 常忽视含量较低的花粉类型(Ren和Beug, 2002; Xiao等, 2004; Xu等, 2017). 这无疑会导致区域植

被属种组成和绝对盖度估算的偏差, 继而影响区域植被对气候变化响应过程及其反馈效应的评估。

研究区主要木本类型0~1000m绝对植被盖度与花粉含量对比结果显示: 栎属、桦属和松属植物的绝对盖度均值分别为41%、12%和13%, 与之对应的花粉含量均值基本相近, 分别占42%、15%和12%(图5a); 而海棠(蔷薇科)、槭属的绝对盖度均值分别达18%、22%, 但对应的花粉含量均低于1%(图5a和5b)。我们认为, 花粉产量、传粉方式、群落结构和地形条件等因素是造成上述差异的主要原因。栎属、桦属多为风媒植物, 花粉产量相对较高, 分布范围广, 且群落结构稳定、树体高大, 导致其传播扩散能力强, 植被代表性高(李月丛等, 2005); 而海棠和槭属等主要为虫媒植物, 花粉产量较低, 且多生长于沟谷或洼地, 使其传播扩散能力弱, 植被代表性低(李永飞等, 2017)。通常认为, 松属植物花粉产量较高(Erdtman和Wodehouse, 1944; Birks和Birks, 1980), 且具有良好的传播能力, 在中国北方常表现为超代表性(李文漪和姚祖驹, 1990; 李月丛等, 2005; 许清海等, 2007; 李永飞等, 2016); 但黄陵地区各样点1000m范围内均有松属植物生长, 平均植被盖度为13.6%(4~29%), 但松属花粉平均含量仅为12%(3~39%), 并不表现为超代表性。对此, 我们认为一方面可能受研究区地形特征影响, 区内主要发育梁峁丘陵, 不利于松属花粉传播; 另一方面, 可能与区内油松植物呈斑块状分布, 且树龄较小(区内油松生长高度低于辽东栎)有关。此外, 研究区主要草本类型蒿属和莎草科绝对植被盖度分别为2%和20%, 但蒿属花粉含量高达11%、莎草科花粉含量不足3%(图5b); 一方面应与蒿属花粉产量相对较高、莎草科花粉产量相对较低有关(许清海等, 2013; 张攀攀等, 2017), 另一方面可能与部分蒿属花粉源于区域外植被, 依靠风力搬运而来, 而莎草科主要生长于林下草本层, 扩散条件差、传播距离小有关。

公海位于黄土高原东北部(图1b), 全新世以来高分辨率孢粉分析(图6a; Xu等, 2017)和气候重建(Chen等, 2015)结果显示: 距今7300~5000年, 公海地区年降水量约为530~610mm; 花粉组合以木本花粉(63~80%)为主, 主要为栎属(15~30%)、松属(10~45%)和桦属(10~20%); 其气候状况与现代黄陵地区较为接近。主坐标分析结果也显示该阶段公海地层花粉组合与现代黄陵表土花粉组合相似。然而, Xu等(2017)根据孢

图5 主要花粉类型与植被对应关系

实线表示中位数, 虚线表示平均值; 箱体上下边界分别为3/4分位点(Q3)和1/4分位点(Q1), 黑点为离群值

粉组合推断距今7300~5000年公海湖区植被组成时, 仅考虑了栎属和松属等主要花粉类型的含量变化, 认为该阶段湖区周围发育以栎属和松属为主的针阔混交林顶级群落; 对花粉组合中含量较低的类型(如槭属、鹅耳枥属和榆属等)未予以关注, 导致其蕴含的植被信息被忽略。本研究结果显示, 黄陵地区槭属和蔷薇科等低代表性花粉类型对应的植被在暖温带落叶阔叶林中占有相当比例(图3d); 因此, 在地层古植被重建时应给予考虑。根据获得的主要木本类型花粉-植被数量(比例)关系(图5), 并考虑低代表性花粉类型的贡献后, 本文尝试重建了公海湖区距今7300~5000年绝对植被盖度, 结果显示(图6b): 栎属、桦属和松属绝对植被盖度分别为21%、16%和29%, 其他落叶阔叶属种绝对植被盖度达33%, 木本植物总绝对盖度在100%左右。我们认为, 利用花粉-植被数量关系校正后的植被重建结果可能更接近距今7300~5000年公海湖区的真实植被组成, 湖区周围应发育以栎属为主的落叶阔叶林顶级群落。因此, 在今后相关研究中应考虑花粉组合中含量较低花粉类型蕴含的植被信息, 以期获得更为准确、可信的花粉-植被数量关系和区域植被演替历史。

图 6 (网络版彩图)山西宁武公海花粉百分比(a)及植被重建结果(b)

6 结论

(1) 研究区主要生长栎属、海棠(蔷薇科)、槭属和桦属等落叶阔叶树种, 0~10m范围内不同样点植被组成差别较大, 具有明显的群落特征, 0~100m植被组成群落差异性减弱, 0~1000m植被组成表现出区域均质性特征。

(2) 研究区花粉组合均以栎属、桦属和松属等木本类型为主, 不同群落花粉组合差异较小, 与0~1000m绝对植被盖度相近, 因此孢粉组合更倾向于指示较大区域的植被组成。

(3) 栎属、桦属和松属花粉含量(42%、15%和12%)与植被盖度(41%、12%和13%)相近, 而蔷薇科和槭属花粉含量均低于1%, 但植被盖度高达22%和18%, 表明不同植物属种花粉-植被对应关系存在明显差异, 花粉产量可能是造成上述差异的主要原因, 而传粉方式、群落结构和地形条件等因素也起到一定作用。

(4) 根据花粉-植被数量关系, 并考虑低代表性花粉类型蕴含的植被信息, 我们认为距今7300~5000年公海湖区为发育以栎属为建群种的落叶阔叶林顶级群落。

上述研究表明, 利用花粉对植被重建的研究中, 应

注重区域优势植物对花粉组合的影响, 并需要考虑低代表性花粉类型蕴含的植被盖度信息, 以期建立准确可靠的花粉-植被关系及区域植被演替历史。

参考文献

- 范玮熠, 王孝安, 郭华. 2006. 黄土高原子午岭植物群落演替系列分析. 生态学报, 26: 706–714
- 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. 1990. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究. 植物学报, (12): 943–950
- 李月丛, 许清海, 肖举乐, 阳小兰. 2005. 中国北方森林植被主要表土花粉类型对植被的指示性. 第四纪研究, 25: 598–608
- 李永飞, 李春海, 介冬梅, 谢贤健. 2016. 长白山北坡表土花粉组合及数量分析. 微体古生物学报, 33: 293–303
- 李永飞, 李春海, 徐柳园, 许斌, 庞有智. 2017. 太白山表土花粉和气孔器与植物类型的关系研究. 古生物学报, (1): 108–116
- 陕西师范大学地理系《延安地区地理志》编写组. 1983. 陕西省延安地区地理志. 西安: 陕西人民出版社. 250
- 陕西省气象局区划办公室. 1988. 陕西省农业气候区划. 西安: 西安地图出版社. 169
- 孙家柄. 2009. 遥感原理与应用. 武汉: 武汉大学出版社. 300
- 王伏雄. 1995. 中国植物花粉形态. 北京: 科学出版社. 461

- 吴征镒. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社. 1375
- 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, 43: 2016–2028
- 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
- 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, 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
- 许英勤, 阎顺, 贾宝全, 杨云良. 1996. 天山南坡表土孢粉分析及其与植被的数量关系. 干旱区地理, (3): 24–30
- 姚祖驹. 1989. 山西中条山地区表土花粉分析. 地理学报, 28: 469–477
- 张平仓, 郑粉莉. 1993. 子午岭地区自然区域特征及其与土壤侵蚀的关系. 水土保持研究, (1): 11–16
- 张攀攀, 许清海, Gaillard M J, 穆会双, 张娅红, 卢静瑶. 2017. 中国北方温带针阔叶混交林主要植物相对花粉产量和相关花粉源范围研究. 第四纪研究, 37: 1429–1443
- 张新时. 2007. 中国植被及其地理格局: 中华人民共和国植被图 (1:1000000)说明书. 北京: 地质出版社. 474
- 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 2002. 子午岭林区北部近50年植被的变化发展. 西北植物学报, 22: 1–8
- 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. Dan Geol Unders Ser II, 96: 1–99
- Anderson R, Koehler P A. 2003. Modern pollen and vegetation relationships in the mountains of southern California, USA. Grana, 42: 129–146
- Birks H J B, Birks H H. 1980. Quaternary Paleocology. London: Edward Arnold. 177–192
- Botkin D B. 1993. Forest Dynamics: An Ecological Model. New York: Oxford University Press. 309
- Box E O, Fujiwara K. 2015. Warm-Temperate Deciduous Forests Around the Northern Hemisphere. Springer International Publishing. 292
- Braak C J F T, Šmilauer P. 2012. Canoco reference manual and user's guide: Software for ordination (version5.0). Wageningen: Micro-computer Power, Itaca
- Broström A, Sugita S, Gaillard M J, Pilesjö P. 2005. Estimating the spatial scale of pollen dispersal in the cultural landscape of southern Sweden. Holocene, 15: 252–262
- Bunting M J, Farrell M, Broström A, Hjelle K L, Mazier F, Middleton R, Nielsen A B, Rushton E, Shaw H, Twiddle C L. 2013. Palynological perspectives on vegetation survey: A critical step for model-based reconstruction of Quaternary land cover. Quat Sci Rev, 82: 41–55
- Chen F, Xu Q, Chen J, Birks H J B, Liu J, Zhang S, Jin L, An C, Telford R J, Cao X, Wang Z, Zhang X, Selvaraj K, Lu H, Li Y, Zheng Z, Wang H, Zhou A, Dong G, Zhang J, Huang X, Bloemendal J, Rao Z. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. Sci Rep, 5: 11186
- D'Odorico P, Gonsamo A, Gough C M, Bohrer G, Morison J, Wilkinson M, Hanson P J, Gianelle D, Fuentes J D, Buchmann N. 2015. The match and mismatch between photosynthesis and land surface phenology of deciduous forests. Agric For Meteorol, 214–215: 25–38
- Davis M B, Goodlett J C. 1960. Comparison of the present vegetation with pollen-spectra in surface samples from Brownington pond, Vermont. Ecology, 41: 346–357
- Djamali M, de Beaulieu J L, Campagne P, Andrieu-Ponel V, Ponel P, Leroy S A G, Akhiani H. 2009. Modern pollen rain-vegetation relationships along a forest-steppe transect in the Golestan National Park, NE Iran. Rev Palaeobot Palynol, 153: 272–281
- Dyke A S. 2005. Late quaternary vegetation history of northern north America based on pollen, macrofossil, and faunal remains. Géogr Phys Quatern, 59: 211
- Erdtman G, Wodehouse R P. 1944. An introduction to pollen analysis. Soil Sci, 57: 241
- Fægri K, Iversen J. 1989. A textbook of pollen analysis. J Biogeogr, IV (4): 328
- Gower J C. 1966. Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. Biometrika, 53: 325
- Grimm E C. 2011. TILIA 1.7.16 Software
- Huntley B. 1990. Studying global change: The contribution of Quaternary palynology. Glob Planet Change, 2: 53–61
- López-Sáez J A, Alba-Sánchez F, López-Merino L, Pérez-Díaz S. 2010. Modern pollen analysis: A reliable tool for discriminating Quercus rotundifolia communities in central Spain. Phytocoenologia, 40: 57–72
- Middleton R. 2011. Vegetation Survey Manager v 2.0
- Prentice I C, Bartlein P J, Webb III T. 1991. Vegetation and climate change in eastern north America since the last glacial maximum. Ecology, 72: 2038–2056
- Ran Y H, Li X, Lu L, Li Z Y. 2012. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. Int J Geogr Inf Sci, 26: 169–191
- Ren G, Beug H J. 2002. Mapping Holocene pollen data and vegetation of China. Quat Sci Rev, 21: 1395–1422
- Ruffaldi P. 1994. Relationship between recent pollen spectra and current vegetation around the cerin peat bog (Ain, France). Rev

- [Palaeobot Palynol](#), 82: 97–112
- Stebich M, Rehfeld K, Schlütz F, Tarasov P E, Liu J, Mingram J. 2015. Holocene vegetation and climate dynamics of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. [Quat Sci Rev](#), 124: 275–289
- Sugita S. 1994. Pollen representation of vegetation in Quaternary sediments: Theory and method in patchy vegetation. [J Ecol](#), 82: 881–897
- Williams J W. 2003. Variations in tree cover in North America since the last glacial maximum. [Glob Planet Change](#), 35: 1–23
- Xiao J, Xu Q, Nakamura T, Yang X, Liang W, Inouchi Y. 2004. Holocene vegetation variation in the Daihai lake region of north-central China: A direct indication of the Asian monsoon climatic history. [Quat Sci Rev](#), 23: 1669–1679
- Xu Q H, Chen F H, Zhang S R, Cao X Y, Li J Y, Li Y C, Li M Y, Chen J H, Liu J B, Wang Z L. 2017. Vegetation succession and East Asian Summer Monsoon Changes since the last deglaciation inferred from high-resolution pollen record in Gonghai lake, Shanxi Province, China. [Holocene](#), 27: 835–846
- Yu G, Ke X, Xue B, Ni J. 2004. The relationships between the surface arboreal pollen and the plants of the vegetation in China. [Rev Palaeobot Palynol](#), 129: 187–198

(责任编辑: 吴海斌)