

中国地层花粉数据集

周伯睿¹ 廖梦娜^{1,2} 李凯^{1,2} 徐德宇¹ 陈海燕¹ 倪健^{1,2*} 曹现勇³ 孔昭宸⁴
许清海⁵ 张芸⁴ Ulrike HERZSCHUH⁶ 蔡永立⁷ 陈碧珊⁸ 陈敬安⁹ 陈陵康¹⁰
程波¹¹ 高洋¹² 黄赐璇¹³ 黄小忠¹⁴ 李升峰¹⁵ 李文漪¹³ 廖淦标¹⁶ 刘光琇¹⁷
刘平妹¹⁸ 刘兴起¹⁹ 马春梅¹⁵ 宋长青²⁰ 孙湘君²¹ 唐领余²² 王曼华²³ 王永波¹⁹
夏玉梅²⁴ 徐家声²⁵ 阎顺²⁶ 羊向东²⁷ 姚轶锋²⁸ 叶传永²⁹ 张志勇³⁰ 赵增友³¹
郑卓³² 朱诚¹⁵

¹浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江金华 321004; ²浙江金华山亚热带森林生态系统野外科学观测研究站, 浙江金华 321004; ³中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统科学国家重点实验室, 北京 100101; ⁴中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ⁵河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050027; ⁶Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam 14473, Germany; ⁷上海交通大学设计学院, 上海 200240; ⁸岭南师范学院地理科学学院, 广东湛江 524048; ⁹中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; ¹⁰广东石油化工学院理学院, 广东茂名, 525000; ¹¹华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; ¹²贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; ¹³中国科学院地理科学与自然资源研究所, 北京 100101; ¹⁴兰州大学环境资源学院, 兰州 730000; ¹⁵南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; ¹⁶Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA; ¹⁷中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; ¹⁸台湾大学地质科学系, 中国台北 10617; ¹⁹首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; ²⁰北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; ²¹同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; ²²中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008; ²³鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025; ²⁴中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; ²⁵自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061; ²⁶中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ²⁷中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; ²⁸中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093; ²⁹中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; ³⁰中国科学院庐山植物园, 江西九江 332900; ³¹西南大学地理科学学院, 重庆 400715; ³²中山大学地球科学与工程学院, 广州 510275

摘要 地层孢粉数据是古植被和古气候重建等古环境研究的重要基础。孢粉数据库推动古环境研究从点到区域和全球尺度, 从定性到定量, 从而实现在大空间尺度和长时间序列上探索植被、气候和人类干扰的相互关系, 以更好地理解地球系统的演变。该数据集整合了全国第四纪末期(5万年以来)共372个地层花粉序列, 涵盖790个花粉类群, 样点分布于中国30个省级行政区与领海。数据集包含地层花粉采样点的地名、经纬度坐标和海拔高度、数据来源、样品类型、沉积物长度、样品数量、测年方法及测年数量、时间跨度和参考文献, 以及每个采样点的花粉含量百分比。数据主要来源于20世纪80年代至今。采样点集中分布在温带和亚热带森林、温带草原和荒漠以及青藏高原高寒植被区域; 在深海到青藏高原不同海拔高度都有分布, 但集中在海拔2 000 m之下。按照数据来源区分, 原始数据样点178个, 占47.8%; 数值化数据194个, 占52.2%。按照样品类型分类, 多数样点为湖泊样品(151个)、冲积物/洪积物样品(99个)与泥炭样品(67个), 占总样点数的85.2%。年代测定的主要方法为放射性碳同位素手段(占样品总数的93.8%), 大部分记录有2–10个测年数据。采样点的平均花粉类群数量是19个, 以4–30个花粉类群的采样点最多。代表性花粉类群(松属(*Pinus*)、栎属(*Quercus*)、蒿属(*Artemisia*)、禾本科)含量的时空分布格局表明, 从末次盛冰期到全新世, 这些花粉科属的分布范围扩大, 含量也增加, 但分布区域具有分异。半个多世纪以来, 孢粉学工作者建立中国大部分地区的地层花粉记录, 为探究古环境演变及其气候变化、人类活动驱动机制奠定了重要的基础。

关键词 花粉数据库; 地层花粉; 第四纪末期; 古植被; 古气候

周伯睿, 廖梦娜, 李凯, 徐德宇, 陈海燕, 倪健, 曹现勇, 孔昭宸, 许清海, 张芸, Herzschuh U, 蔡永立, 陈碧珊, 陈敬安, 陈陵康, 程波, 高洋, 黄赐璇, 黄小忠, 李升峰, 李文漪, 廖淦标, 刘光琇, 刘平妹, 刘兴起, 马春梅, 宋长青, 孙湘君, 唐领余, 王曼华, 王永波, 夏玉梅, 徐家声, 阎顺, 羊向东, 姚轶锋, 叶传永, 张志勇, 赵增友, 郑卓, 朱诚 (2023). 中国地层花粉数据集. 植物生态学报, 47, 1453-1463. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0316

收稿日期Received: 2022-07-26 接受日期Accepted: 2022-10-31

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19050103, XDA2009000003和XDB31030104)和国家自然科学基金(41971121)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA19050103, XDA2009000003 and XDB31030104) and the National Natural Science Foundation of China (41971121).

* 通信作者Corresponding author (nijian@zjnu.edu.cn)

A fossil pollen dataset of China

ZHOU Bo-Rui¹, LIAO Meng-Na^{1,2}, LI Kai^{1,2}, XU De-Yu¹, CHEN Hai-Yan¹, NI Jian^{1,2*}, CAO Xian-Yong³, KONG Zhao-Chen⁴, XU Qing-Hai⁵, ZHANG Yun⁴, Ulrike HERZSCHUH⁶, CAI Yong-Li⁷, CHEN Bi-Shan⁸, CHEN Jing-An⁹, CHEN Ling-Kang¹⁰, CHENG Bo¹¹, GAO Yang¹², HUANG Ci-Xuan¹³, HUANG Xiao-Zhong¹⁴, LI Sheng-Feng¹⁵, LI Wen-Yi¹³, LIU Kam-Biu¹⁶, LIU Guang-Xiu¹⁷, LIU Ping-Mei¹⁸, LIU Xing-Qi¹⁹, MA Chun-Mei¹⁵, SONG Chang-Qing²⁰, SUN Xiang-Jun²¹, TANG Ling-Yu²², WANG Man-Hua²³, WANG Yong-Bo¹⁹, XIA Yu-Mei²⁴, XU Jia-Sheng²⁵, YAN Shun²⁶, YANG Xiang-Dong²⁷, YAO Yi-Feng²⁸, YE Chuan-Yong²⁹, ZHANG Zhi-Yong³⁰, ZHAO Zeng-You³¹, ZHENG Zhuo³², and ZHU Cheng¹⁵

¹College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China; ²Jinhua Mountain Observation and Research Station for Subtropical Forest Ecosystems, Jinhua, Zhejiang 321004, China; ³State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System Science, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ⁴State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ⁵College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050027, China; ⁶Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam 14473, Germany; ⁷School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ⁸School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China; ⁹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; ¹⁰College of Sciences, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China; ¹¹College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; ¹²School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; ¹³Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ¹⁴College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; ¹⁵School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; ¹⁶Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA; ¹⁷Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ¹⁸Department of Geosciences, Taiwan University, Taipei 10617, China; ¹⁹College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; ²⁰State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ²¹School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; ²²Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²³School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China; ²⁴Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130102, China; ²⁵The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resource, Qingdao, Shandong 266061, China; ²⁶Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; ²⁷Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²⁸State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ²⁹Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; ³⁰Lushan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang, Jiangxi 332900, China; ³¹School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; and ³²School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract

Fossil pollen and spore records provide highly creditable proxy data to investigate the past environmental changes such as palaeovegetation and palaeoclimate. Pollen database promotes past environmental studies from local to regional and global scales and from qualitative to quantitative reconstructions. This is of great significance on exploring the interactions among past vegetation, climates and anthropogenic disturbances at large spatial scale and long temporal scale, to better understand the evolution of the earth system. In this paper, a fossil pollen dataset of China is compiled, by synthesizing 372 original or digitized fossil pollen records including 790 pollen taxa in China's land and ocean during the late-Quaternary (since 50 ka BP). The dataset includes site names, latitude, longitude and altitude, pollen data source, sample type, sediment length or span, sample number of each site, dating method and dating number, age span and reference, as well as the fossil pollen percentage of each sampling site. The pollen data, mostly published from late 1980s to present, are concentrated in vegetation regions of temperate and subtropical forests, temperate grasslands, temperate deserts and alpine vegetation on the Qingzang Plateau. Sample sites are distributed at different altitudes from deep sea to high Qingzang Plateau, but the majority of the sites are located between 0–2 000 m. The dataset comprises of 178 raw pollen records (47.8%) and 194 digitized pollen records (52.2%). Pollen samples are mainly from lake sediment (151 sites), alluvial/fluvial sediment (99 sites), and peat (67 sites), accounting for 85.2% of the total sampling sites. Radiocarbon is the main dating method that accounts for 93.8% of total samples, and most of the sites have 2–10 radiocarbon dating data. Each site has an average number of pollen taxa of 19, with the most sites having 4–30 pollen taxa. The temporal and spatial distribution of representative pollen taxa (*Pinus*, *Quercus*, *Artemisia* and Poaceae) reveals increasing trends both in their distributional range and pollen concentration from the last glacial maximum to Holocene, but such trends have various patterns in different parts of China. This fossil pollen dataset is a fruitful work of collection of pollen records in most territory of China that conducted by palynologists from China and overseas during the last half century. It consolidates the valuable and fundamental data that can be potentially utilized to explore the evolution of past environments and their driving mechanism of climate change and human disturbance.

Key words pollen database; fossil pollen; late-Quaternary; palaeovegetation; palaeoclimate

Zhou BR, Liao MN, Li K, Xu DY, Chen HY, Ni J, Cao XY, Kong ZC, Xu QH, Zhang Y, Herzs Schuh U, Cai YL, Chen BS, Chen JA, Chen LK, Cheng B, Gao Y, Huang CX, Huang XZ, Li SF, Li WY, Liu KB, Liu GX, Liu PM, Liu XQ, Ma CM, Song CQ, Sun XJ, Tang LY, Wang MH, Wang YB, Xia YM, Xu JS, Yan S, Yang XD, Yao YF, Ye CY, Zhang ZY, Zhao ZY, Zheng Z, Zhu C (2023). A fossil pollen dataset of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 1453-1463. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0316

在古环境研究领域的众多代用指标中, 孢粉(本文在陈述普遍意义上的孢粉学研究时, 使用“孢粉”一词, 而在讲述特定研究的表土和地层花粉记录时, 使用“花粉”一词)是保存好、数量丰富、可体现植物类群生态差异的最佳代表, 常用于定量反演过去植被与气候格局及其变迁, 从而深入探究古环境演变历史及其驱动机制, 以及人类活动对古环境演变的影响(Prentice & Webb III, 1998; Prentice *et al.*, 2000; Birk *et al.*, 2010; Chevalier, 2020)。基于诸多单点孢粉时序记录建立的孢粉数据库, 使得古生态学研究从点到区域、全球, 从定性分析走向定量重建, 并在大空间尺度和长时间序列上探索植被、气候与人类干扰的相互关系, 也为更好地理解阐释地球系统特征奠定了基础(Prentice *et al.*, 2000; Harrison, 2003; Cao *et al.*, 2013, 2015, 2020; Ni *et al.*, 2014; Davis *et al.*, 2020)。完善、可靠、开放的孢粉数据库是古生态学研究的重要需求, 也是地球科学研究的重要基础。然而, 我国目前尚缺少这样的孢粉数据库(倪健等, 2010; 陈海燕等, 2021)。

在孢粉学工作者多年的努力下, 近年发表了一个更新的全国现代花粉数据集(陈海燕等, 2021), 该文概述了全球孢粉数据库的现状, 以及我国孢粉数据收集和数据库建设的历史, 在此不再赘述。对地层花粉而言, 我国学者也曾发布过几个版本的数据库, 比如早期在国际BIOME 6000项目中建立的中国第四纪孢粉数据库(孙湘君等, 1999; Yu *et al.*, 2000), 近期新推出的花粉数据库, 如东亚大陆数据库包括中国、蒙古和俄罗斯西伯利亚地区(Cao *et al.*, 2013, 2022; Ni *et al.*, 2014), 以及在最新标准化的全球第四纪末期花粉数据集中也包含中国的地层花粉样点(Herzs Schuh *et al.*, 2022)。

截至目前, 在全球科学数据建设与信息共享飞速发展的大背景下, 中国的孢粉数据库工作仍进展缓慢, 现有数据库的数据体量小、共享程度有限、持续更新能力较差, 数据库及网站建设乏力(倪健等, 2010; 陈海燕等, 2021)。在《中国现代花粉数据集》(陈海燕等, 2021)发表并被众多孢粉学工作者应用的激励下, 本文继续更新了中国第四纪晚期地层花粉数据集, 以期重建我国第四纪古植被与古气

候, 探究植物类群和植被分布格局的变迁, 阐明生物多样性的形成及其与古气候变化的相互关系等研究工作提供基础数据支撑。

1 材料和方法

参考《中国现代花粉数据集》(陈海燕等, 2021), 本文的地层数据不涉及孢子, 所以统称花粉。本数据集是在第一版中国第四纪孢粉数据库的部分数据(Yu *et al.*, 1998, 2000)以及课题组前期收集的地层花粉数据(Cao *et al.*, 2013; Ni *et al.*, 2014)基础上的扩充, 包括两种来源: 一是原始数据, 包括作者从野外采样并鉴定的花粉数据, 以及摘录自文献中的原始花粉记录; 二是数值化数据, 从发表文献中对花粉图谱进行数值化。在获得地层花粉数据后, 对数据进行一系列的校正, 如删除重复与低质量的采样点数据、校正采样点坐标、花粉类群名称的标准化、花粉含量百分比的统一化、地层年代校正等, 最终建立格式统一, 花粉类群和地层年代校正的中国第四纪末期花粉数据集。

收集到的花粉记录中, 某些来自同一采样点, 但数据来源不同, 或来自不同数据贡献者, 或来自基于同一花粉数据的不同文献。另外, 有些花粉数据在前期未获得原始数据而数值化了花粉图谱, 但后期又获得了原始记录。针对这样的重复花粉记录, 首先选择原始数据; 若均为数值化数据, 则保留测年和花粉类群多的样点。删除无年代记录或花粉类型很少的样点, 对只有一个年代记录的样点, 则分情形处理: 如果该样点周边无可替代的高质量花粉记录, 则保留该样点, 否则就删除。因此, 本数据集的绝大多数地层花粉样点至少有两个年代记录, 每个样点, 尤其对数值化记录, 其花粉类群清单尽量完整、数量尽可能多。然而, 数值化花粉数据存在一个问题, 就是大部分发表的花粉图谱只展示了优势和常见的花粉类群, 没有包括所有鉴定到的花粉, 对于数据的进一步引申可能产生一定的影响, 需要数据使用者注意。

由于采样时间较久, 少部分采样点缺失经纬度坐标, 则利用中国地名录(国家测绘局地名研究所, 1994)或谷歌地图等估计这些采样点的地理坐标。少

数采样点经纬度坐标记录有误, 则同样校正之。

少部分花粉类群的拉丁名有拼写错误, 或者在新旧分类系统中的拉丁名不一致, 需要校正统一。订正少数拼写错误的拉丁名, 利用最新的被子植物种系发生学 (APG IV) 分类系统 (The Angiosperm Phylogeny Group, 2016), 以及来自中国植物物种信息系统“植物智” (<http://www.iplant.cn/>) 的网络版中国植物志, 对在新旧分类系统中学名不一致或有异名的花粉类群进行订正, 某些亚科归并到科中 (表1)。对组合花粉类群, 如松属 (*Pinus*) + 云杉属 (*Picea*) 和云杉属 + 松属, 则统一花粉名称顺序。需要特别注意的是, 根据分子系统学证据, 新的植物分类系统对部分植物科属进行了拆分或者合并, 比如, 现今把藜科 (*Chenopodiaceae*) 和苋科 (*Amaranthaceae*) 合并为新的苋科 (*Amaranthaceae*), 但在传统的孢粉学研究中, 一直将二者分开鉴定。为了保持数据的原貌, 本文对这样的科属并未进行合并, 而是保留了原始鉴定类群, 请数据使用者根据自己的研究目的决定其进一步合并还是拆分使用。

获取的花粉数据有百分比和粒数两种记录, 本数据集去除对区域植被指示意义不显著的水生植物花粉以及蕨类和藻类植物孢子, 但保留水生植物的莎草科植物花粉 (陈海燕等, 2021), 然后重新计算各

花粉类群含量的百分比。为减少不同花粉记录间由于鉴定而产生的差异, 将极少数鉴定到种的花粉类群统一合并到其所在的属中。

对测年数据进行两种处理。对有原始测年数据和地层深度的样点, 统一采用标准方法重新构建年代模型。根据文献及数据贡献者提供的常规测年数据, 采用 CALIB 7.0 中的 IntCal13 曲线对常规 ^{14}C 年代进行校正 (Reimer *et al.*, 2013), 并通过贝叶斯模型建立年代-深度关系 (Blaauw, 2010)。贝叶斯年代模型建立采用 R 语言程序包 “rbacon” 完成 (Blaauw & Christen, 2011)。对于没有年代误差的数据, 则采用两点间线性内插法获得不同深度的沉积年代。某些数值化的花粉记录只有插值好的年代序列, 缺少地层深度数据, 则直接采用花粉图谱中的年代记录; 若有深度记录, 则采用上述方法重新构建年代模型。

与中国现代花粉数据集 (陈海燕等, 2021) 保持一致, 中国地层花粉数据集的采样点经纬度统一以度 ($^{\circ}$) 为单位, 并保留到小数点后 2 位; 海拔高度以 m 为单位, 仅保留整数; 花粉含量以百分比 (%) 表达, 保留到小数点后 2 位。

2 结果

本数据集包含中国第四纪末期 (50 ka BP 以来) 地层花粉信息表和数据表 (附录)。信息表包括采样点编号、中英文地名和省级行政区划名称、经纬度、海拔高度、数据来源、样品类型、沉积物长度、取样长度或区间、原始样品与数据集样品数量、测年方法与数量、时间跨度、花粉类群数量、参考文献及其发表年份。数据表则展示了第四纪末期地层花粉谱数据矩阵表, 包括编号、采样点地名、经纬度、海拔高度、花粉类群中文名、拉丁名、科属信息, 以及每个样点对应的所有花粉类群含量的百分比。

2.1 样点统计

本数据集共有 372 个样点。从样点分布 (图 1A) 来看, 我国第四纪末期的地层花粉样点主要分布在亚热带常绿阔叶林区域 (106 个, 占总样点数量的 28.5%); 温带草原区域 (62 个, 占 16.7%)、温带荒漠区域 (56 个, 占 15.1%)、青藏高原高寒植被区域 (53 个, 占 14.2%)、暖温带落叶阔叶林区域 (48 个, 占 12.9%) 也拥有较为丰富的地层样点, 其他植被区域样点分布相对较少, 分别为热带季雨林-雨林区域 (18 个, 占 4.8%)、温带针阔叶混交林区域 (15 个, 占

表1 花粉类群学名订正

Table 1 Revision of scientific name of some pollen taxa

| 原始类群名 Original taxa name | 统一后类群名 Unified taxa name |
|----------------------------|-------------------------------|
| 番桫欏属 <i>Cyathea</i> | 桫欏属 <i>Alsophila</i> |
| 伞形科 <i>Umbelliferae</i> | 伞形科 <i>Apiaceae</i> |
| 棕榈科 <i>Palmae</i> | 棕榈科 <i>Arecaceae</i> |
| 菊科 <i>Compositae</i> | 菊科 <i>Asteraceae</i> |
| 舌状花亚科 <i>Cichorioideae</i> | 菊科 <i>Asteraceae</i> |
| 管状花亚科 <i>Tubuliflorae</i> | 菊科 <i>Asteraceae</i> |
| 十字花科 <i>Cruciferae</i> | 十字花科 <i>Brassicaceae</i> |
| 白花菜科 <i>Capparidaceae</i> | 山柑科 <i>Capparaceae</i> |
| 藤黄科 <i>Guttiferae</i> | 藤黄科 <i>Clusiaceae</i> |
| 蝶形花亚科 <i>Leguminosae</i> | 豆科 <i>Fabaceae</i> |
| 蝶形花科 <i>Papilionaceae</i> | 豆科 <i>Fabaceae</i> |
| 苏木科 <i>Caesalpiniaceae</i> | 豆科 <i>Fabaceae</i> |
| 含羞草科 <i>Mimosaceae</i> | 豆科 <i>Fabaceae</i> |
| 小二仙草科 <i>Haloragaceae</i> | 小二仙草科 <i>Haloragidaceae</i> |
| 驼绒藜属 <i>Ceratoides</i> | 驼绒藜属 <i>Krascheninnikovia</i> |
| 唇形科 <i>Labiatae</i> | 唇形科 <i>Lamiaceae</i> |
| 柳叶菜科 <i>Oenotheraceae</i> | 柳叶菜科 <i>Onagraceae</i> |
| 禾本科 <i>Gramineae</i> | 禾本科 <i>Poaceae</i> |

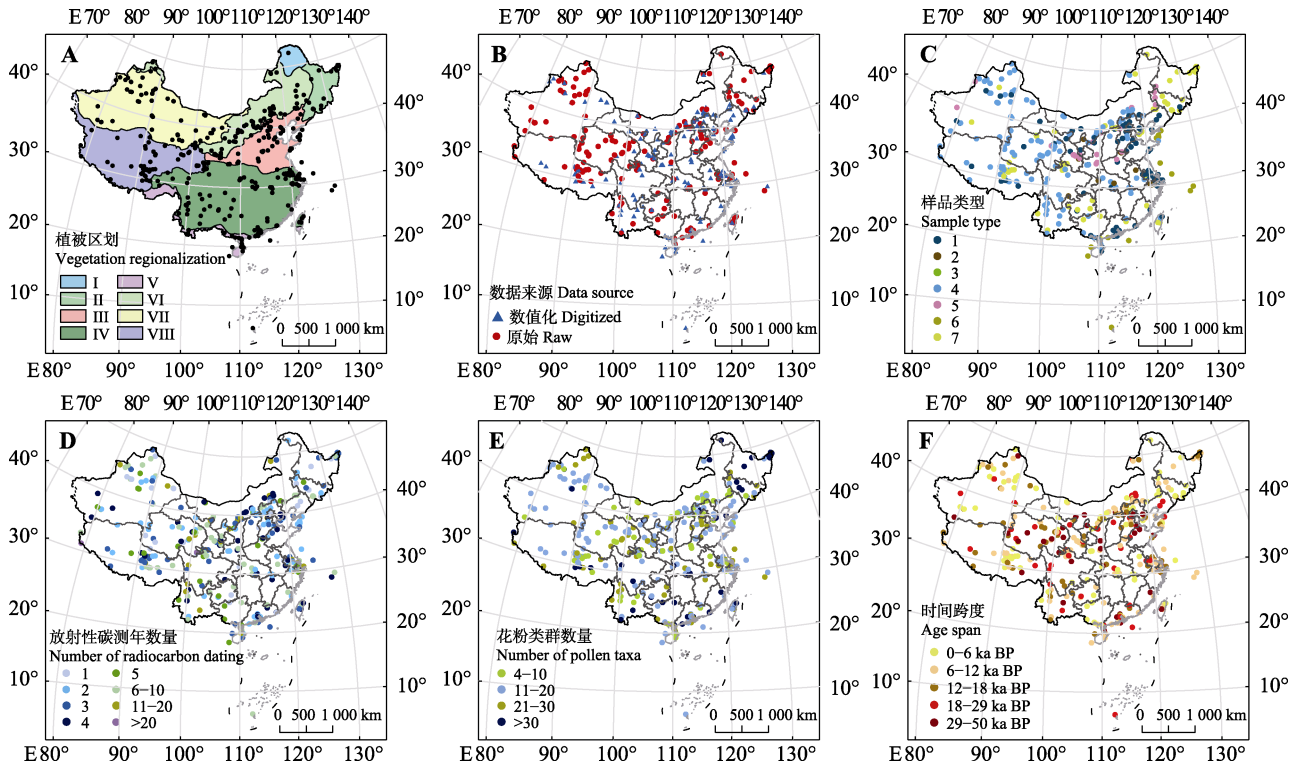


图1 中国第四纪末期地层花粉样点分布。**A**, 样点分布图, 背景为中国植被区划图(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2007)。I, 寒温带针叶林区域; II, 温带针阔叶混交林区域; III, 暖温带落叶阔叶林区域; IV, 亚热带常绿阔叶林区域; V, 热带季雨林-雨林区域; VI, 温带草原区域; VII, 温带荒漠区域; VIII, 青藏高原高寒植被区域。**B**, 数据来源图。**C**, 样品类型图。1, 冲积物/洪积物; 2, 考古遗址; 3, 冰川; 4, 湖泊; 5, 黄土/古土壤; 6, 海洋; 7, 泥炭。**D**, 放射性碳测年数量图。**E**, 花粉类群数量图。**F**, 时间跨度图。

Fig. 1 Sampling sites of late-Quaternary fossil pollen in China. **A**, Sample site distribution, the background is the vegetation regionalization of China (Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences, 2007). I, cold-temperate coniferous forests; II, temperate mixed coniferous and broad-leaved forests; III, warm-temperate broad-leaved deciduous forests; IV, subtropical evergreen broad-leaved forests; V, tropical monsoon rainforests and rainforests; VI, temperate grasslands; VII, temperate deserts; VIII, alpine vegetation on the Qingzang Plateau. **B**, Data sources. **C**, Sample types. 1, alluvial/fluvial; 2, archaeological site; 3, ice; 4, lake; 5, loess/palaeosol; 6, marine; 7, peat. **D**, Number of radiocarbon dating. **E**, Number of pollen taxa in a sampling site. **F**, Age span of sampling sites.

4.0%)与寒温带针叶林区域(1个, 占0.3%), 共占9.1%; 此外还有少数位于海洋的花粉样点(13个, 占3.5%)。从行政区划来看, 第四纪末期地层花粉样点遍布我国30个省级行政区与领海(图1B), 其中内蒙古(41个, 占11.2%)、新疆(39个, 占10.5%)、西藏(30个, 占8.1%)和青海(30个, 占8.1%)的样点数量最多。然而, 东北地区、内蒙古北部、西北地区的塔里木盆地和河西走廊与青藏高原西部等地区仍未收集到已发表的地层花粉数据, 或者存在空白的采样区; 胡焕庸线以东城市化程度高、人类活动密集的地区, 虽然目前收集到的地层样点较多, 但一些人为干扰剧烈的区域, 如四川盆地、云南中部、广西、湖南、江西、浙江和福建的大部分地区, 收集到的地层样点也相对较少, 或者也存在采样空白(图1B)。

从数据来源(图1B)看, 数据集包含原始数据的

样点数量为178个, 占总样点数量的47.8%; 数值化数据的样点数量为194个, 占总数的52.2%。其中前者在全国较均匀分布, 而后者则主要集中在中东部地区。根据样点的沉积物岩性与地理属性可将样品类型分为7类(图1C), 其中湖泊、冲积物/洪积物与泥炭样品占主体地位, 分别有151 (40.6%)、99 (26.6%)与67 (18.0%)个, 共占样品总数的85.2%, 此外还有黄土/古土壤(27个, 占7.3%)、考古遗址(14个, 占3.8%)、海洋(13个, 占3.5%)与冰芯样品(1个, 占0.2%)。

地层样品的年代测定主要有放射性碳同位素法(包括常规 ^{14}C 测年和加速器质谱(AMS)测年)、热释光(TL)、光释光(OSL)、铅(^{210}Pb)、电子自旋共振(ESR)、铀系(Uranium)等方法, 而放射性碳同位素测年是主要手段, 基于放射性碳同位素测年的样点占总数的93.8%。从 ^{14}C 测年的数量(图1D)来看, 大部

分样品都拥有2个及以上测年数据(315个, 占84.7%), 其中以2个(74个, 占总数的19.9%), 3个(60个, 占总数的16.1%), 4个(46个, 占总数的12.4%), 5个(31个, 占总数的8.3%), 6–10个(67个, 占总数的18.0%)测年数据的样点居多。

数据集内的样点最多拥有73个花粉类群, 最少拥有4个花粉类群(图1E)。其中以拥有11–20个类群的花粉记录最多, 有176个记录, 占总体的47.3%。拥有21–30个类群(80个, 占21.5%)与4–10个类群(68个, 占18.3%)数量的花粉记录位居其后。拥有30个以上花粉类群的记录有48个, 占总体的12.9%。本数据集花粉记录的时间末端截取至50 ka BP, 大于该时间的样点较少, 因此未纳入本数据集。数据集内时间跨度位于深海氧同位素阶段(Marine isotope stages, MIS)-3期至MIS-2末期(50–29 ka BP)与MIS-2末期至末次盛冰期(29–18 ka BP)的花粉记录均为46个, 各占总体的12.4%; 位于末次盛冰期至全新世早期(18–12 ka BP)的花粉记录有74个, 占总体的19.9%。一半以上的花粉记录在全新世, 其中分布于全新世早期至中期(6–12 ka BP)的花粉记录有120个, 占32.3%; 全新世中期至今(6–0 ka BP)的花粉记录有86个, 占23.1% (图1F)。

地层样点的海拔跨度大, 从低于海平面的深海钻孔(–1 556 m)到超过5 000 m的青藏高原(5 325 m)都有分布。以500 m为间隔建立海拔分布图(图2A)可知, 0–500 m的海拔区间里分布有最多的样点(127个, 占34.1%), 还有相对多样点分布在海拔500–1 000 m (36个, 9.7%)、1 000–1 500 m (58个, 15.6%)、1 500–2 000 m (28个, 7.5%)、4 500–5 000 m (29个, 7.8%)。本数据集包含367篇发表于1989–2021年间的地层花粉记录, 占记录总数的98.7% (图2B),

其中花粉记录最多的发表年代为2000–2009年, 共计147篇, 占记录总数的39.5%, 1990–1999年(108篇, 29.0%)、2010–2019年(71篇, 19.1%)、1981–1989年(35篇, 9.4%)间发表的花粉记录也相对较多, 2020–2021年新发表的记录有6篇, 占总数的1.6%, 此外数据集还包括少量的未发表数据, 共计5个样点, 占总数的1.3%。

2.2 地层花粉空间分布特征

本数据集共包含790个花粉类群, 其中出现频次最高的有: 松属(350个花粉记录, 占总样点数的94.1%), 禾本科(346个, 占93.0%), 蒿属(*Artemisia*, 337个, 占90.6%), 藜科(297个, 占79.8%), 桦木属(*Betula*, 277个, 占74.5%), 莎草科(267个, 占71.8%), 菊科(258个, 占69.4%), 栎属(*Quercus*, 235个, 占63.2%), 榆属(*Ulmus*, 212个, 占57.0%), 麻黄属(*Ephedra*, 210个, 占56.5%), 柳属(*Salix*, 176个, 占47.3%), 云杉属(165个, 占44.4%), 毛茛科(165个, 占44.4%)等, 此外豆科(159个, 占42.7%), 十字花科(155个, 占41.7%), 胡桃属(*Juglans*, 152个, 占40.9%), 桤木属(*Alnus*, 150个, 占40.3%), 蓼属(*Polygonum*, 149个, 占40.1%), 伞形科(143个, 占38.4%), 蔷薇科(135个, 占36.3%), 唐松草属(*Thalictrum*, 132个, 占35.5%)等出现频次也较高。

以松属、蒿属、禾本科与栎类花粉作为代表类群, 其中栎类分为落叶栎、常绿栎以及其他无法区分的栎类花粉3类, 常绿栎包括了锥属(*Castanopsis*)、青冈属(*Cyclobalanopsis*)、柯属(*Lithocarpus*)。描述4类代表性花粉在6个主要时间段(3 000 ± 250) a BP、(6 000 ± 250) a BP、(8 000 ± 250) a BP、(12 000 ± 250) a BP、(15 000 ± 250) a BP、(18 000 ± 250) a BP的空间分布格局。

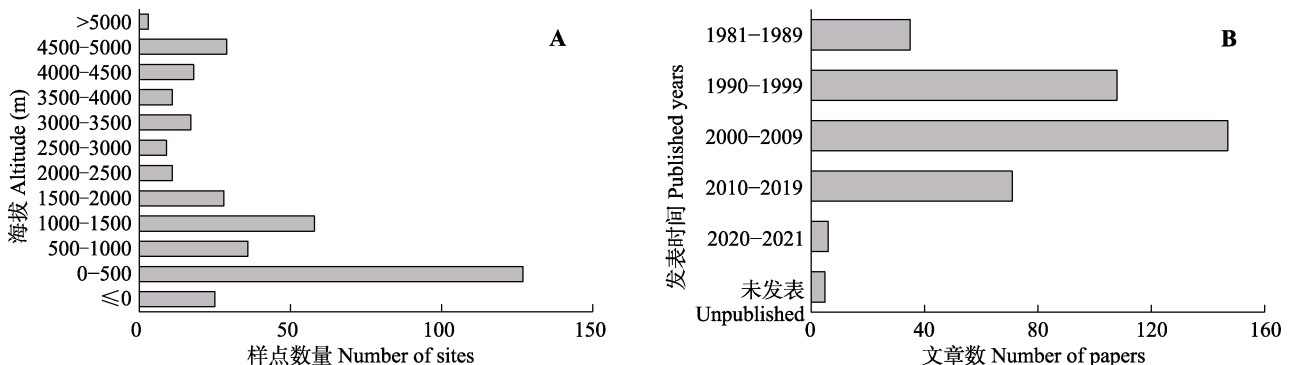


图2 中国第四纪末期地层花粉样点的海拔(A)和发表年代分布(B)。

Fig. 2 Altitude (A) and published years (B) of late-Quaternary fossil pollen sites in China.

松属植物是广温型植物, 其花粉产量高, 在我国大量分布, 尤其是在青藏高原东部和东南边缘以东的广大森林地区, 自末次盛冰期(18 ka BP)至全新世, 松属花粉的分布区逐渐扩大, 而且含量逐渐增加, 尤其是进入全新世以来(图3)。

高含量蒿属花粉主要分布在我国中部到北部和西北地区, 与草原和荒漠植被的进退有关。从未次盛冰期到全新世, 蒿属花粉从中北部地区逐渐向四周扩展, 在全新世中期和后期占据了长江以北的大部分地区(图4)。蒿属花粉在全新世的分布与我国现代温带草原、温带荒漠、暖温带落叶阔叶林区域以及青藏高原高寒植被的分布相似。禾本科花粉在中部、西部、东部和东南地区的沿海分布较广泛, 但分布较零散。自末次盛冰期到全新世, 禾本科花粉的分布区从中部和北部逐渐扩展到西部、东部和南部地区, 但其含量变化不显著, 除了西部地区有增加趋势外, 其他地区的含量变化相对较小(图5)。

蒿属与禾本科的花粉含量、分布变化与草原和荒漠植被的发展有密切关系。纵观各时间段, 高含量的蒿属花粉主要分布在中国中纬度地区, 且继续朝高纬度方向发展, 而禾本科花粉的分布相对更为

均匀。

栎类花粉主要分布在我国中部和东部地区, 自末次盛冰期以来, 其分布范围逐渐扩大, 含量百分比也逐渐增加。常绿栎与落叶栎在各代表时间段均主要分布在我国低纬度地区。常绿栎花粉自末次盛冰期到进入全新世, 主要分布在中国南部与东部沿海地区, 而同一时期落叶栎的分布范围更狭窄, 且各样点的落叶栎含量百分比呈现整体下降趋势。全新世早期(8 ka BP)时常绿栎花粉大量分布于中国中部地区, 并拥有较大的百分比含量, 相比之下, 落叶栎在全新世末期(3 ka BP)时才开始在中国中部与中北部地区出现零星分布(图6)。但需要注意的是, 落叶栎的分布点相对较少, 这与多数学者在鉴定时不区分常绿和落叶栎有一定关系。

3 讨论

3.1 本数据集的优势与缺陷

本数据集应该是迄今为止发表的中国区域内最新、最完整的地层花粉数据集。虽然前期陆续发表了一些中国地层孢粉或花粉数据库, 但或者未公开数据, 需要与作者联系索取, 或者仅内部发布, 未

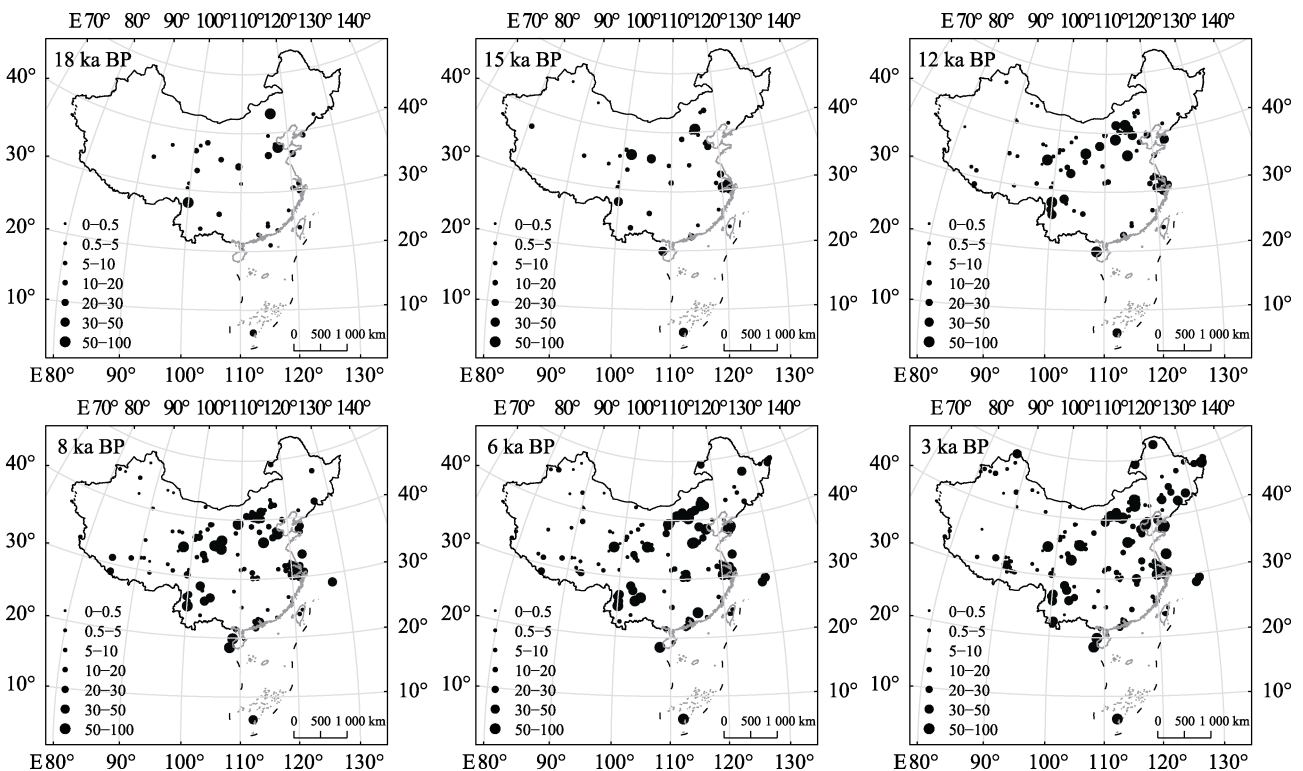


图3 代表性花粉类群松属含量百分比的时空分布特征。

Fig. 3 Temporal-spatial distributions of pollen percentage of representative pollen taxa *Pinus*.

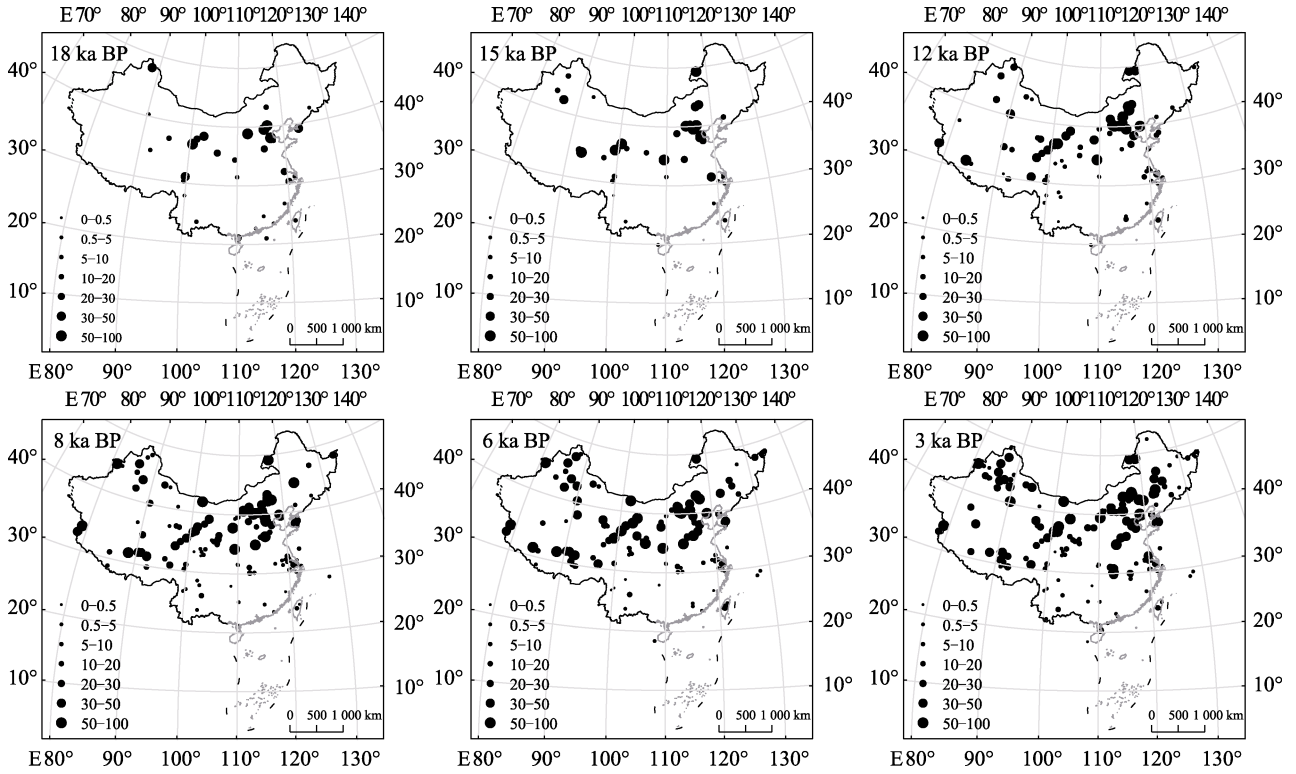


图4 代表性花粉类群蒿属含量百分比的时空分布特征。

Fig. 4 Temporal-spatial distributions of pollen percentage of representative pollen taxa *Artemisia*.

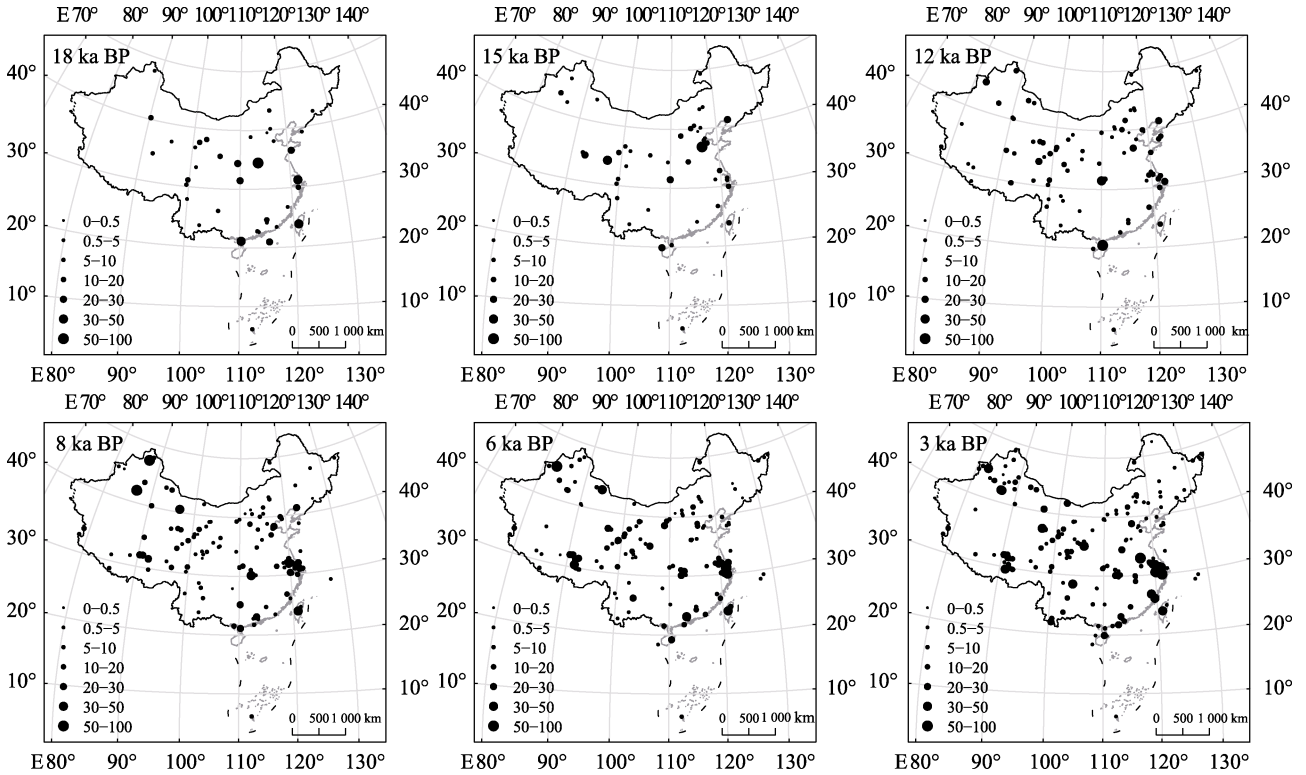


图5 代表性花粉类群禾本科含量百分比的时空分布特征。

Fig. 5 Temporal-spatial distributions of pollen percentage of representative pollen taxa *Poaceae*.

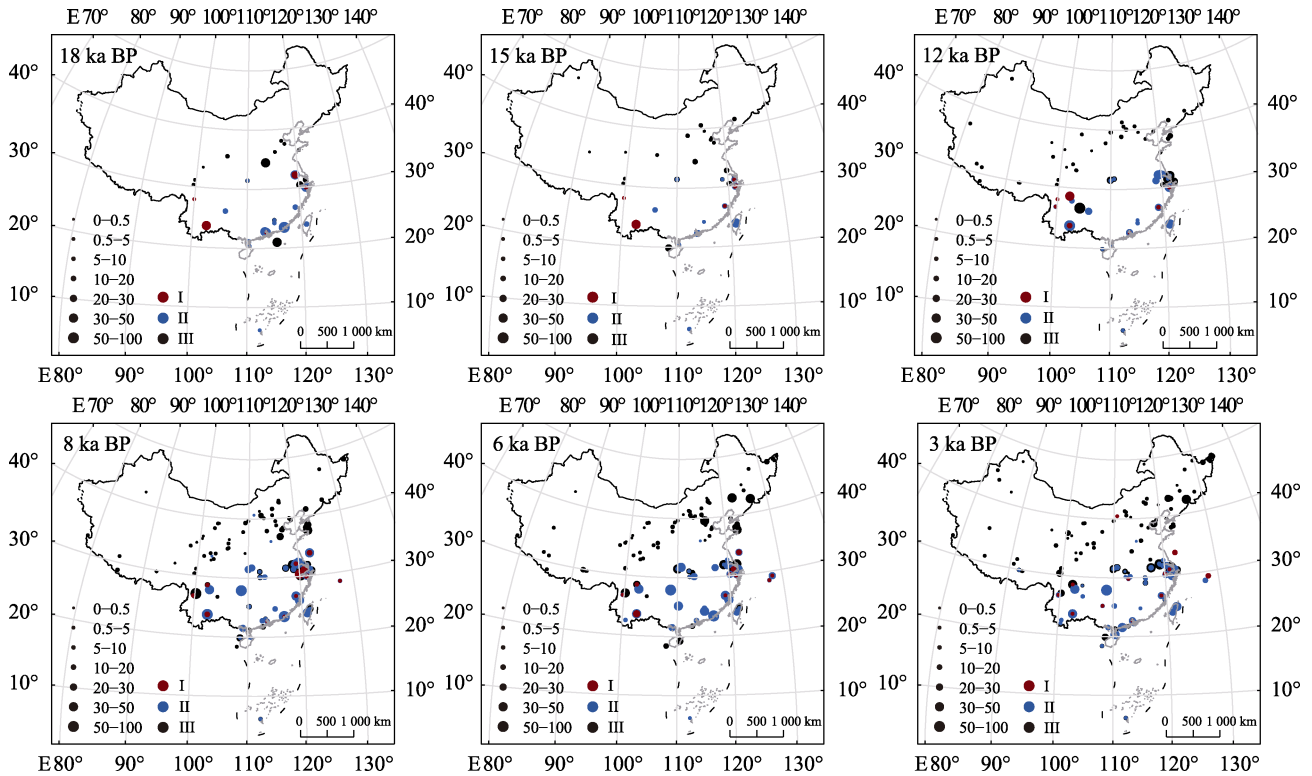


图6 代表性花粉类群栎类含量百分比的时空分布特征。I, 落叶栎类; II, 常绿栎类; III, 未区分栎类。

Fig. 6 Temporal-spatial distributions of pollen percentage of representative pollen taxa *Quercus* type. I, evergreen *Quercus* type; II, deciduous *Quercus* type; III, undefined *Quercus* type.

能全面共享。此外, 大部分数据涵盖整个东亚或者全球(Cao *et al.*, 2013; Herzsuh *et al.*, 2022), 而不是仅涉及中国境内数据, 因此中国国界内的采样点数量偏少。本文数据集的采样点分布范围广, 在中国8个植被区域均有记录, 样品类型多样, 且以湖泊、泥炭、冲积物或洪积物等理想花粉载体的样品数量最多, 具有一定的代表性。数据集集合了中国最近40年的地层花粉研究成果, 绝大部分都具有准确的测年数据, 而且数据的收集、提取与整理都严格控制质量, 包括采样点的地理信息以及采样信息, 花粉数据本身以及测年数据的统一校正, 以确保数据集的准确和有效。

然而, 本数据集也存在一定的缺陷。首先, 原始数据样点仅有178个, 不到数据集采样点总数量的一半, 超过一半的采样点都是数值化数据, 它们仅包括作者发表的重要花粉类群, 而无法涵盖该样点所能鉴定出的所有花粉科属; 虽然, 在对数值化花粉数据进行处理时, 重新按照所展示的花粉类群进行了百分比的标准化, 这对一个地区的古植被重建影响应该较小, 但对于其他更深入的数据引申, 需要持谨慎态度。此外, 虽然现在可以利用计算机软

件进行数值化, 但仍需要一定的手工操作, 由此不可避免地造成一定的数据偏差, 从而影响数据的精度。其次, 本数据集所收集数据的发表时间跨度较大, 部分早期的地层花粉数据缺乏精确的年代数据。为了填补数据点的地理缺失, 我们保留了少数这样的样点, 需要读者在使用数据集时注意。第三, 由于数据共享的问题, 或者由于作者收集不到位, 也或者确实无采样点, 我国的很多地区仍然缺少地层花粉采样点, 在西部、东北地区以及城市化程度高、人口密集的中部、东部和东南部等仍存在花粉记录的空白区域, 需要在未来继续收集补充或者采样测定。

3.2 本数据集的潜在用途与未来发展方向

中国第四纪末期地层花粉数据集与中国现代花粉数据集(陈海燕等, 2021)相配合, 可为重建区域乃至洲际和全球的古植被与古气候演变提供丰富的花粉资料, 为气候变化和人类活动对地球生态系统的影响研究奠定基础, 也为探究地质和历史时期植物类群的演化和古生物多样性的变化提供数据。基于该数据集可进行以下研究。例如, 基于现代和地层花粉数据集, 可进一步研究现代花粉-植被-气候和

人类活动的相互关系,并将其拓展到地质与历史时期。基于花粉数据的古植被和古气候定量重建,无论是采取花粉生物群区化方法还是景观重建算法定量重建古植被,还是利用现代类比法、转换函数法等定量重建古气候,这些数据均为其坚实基础,尤其是原始花粉记录。全新世地层花粉的变化及其与气候变化和人类活动的关联,尤其是最近2 000年来的变化,也是一个重要议题。其他基于花粉记录探究如亚洲季风的演变、花粉产量与花粉代表性、古植被和古气候模拟校验、古生物地球化学循环特征,以及基于机器学习方法研究古环境的变迁等,都是未来需要进一步开展的研究。

从数据集本身来看,未来需要继续填补地层花粉采样空白区域的记录,更新数据集,以更多的原始花粉记录替换数值化数据,从而完善和扩充我国第四纪末期地层花粉数据库,也包括现代花粉数据库的更新和完善,从而建立一套完整并与国际接轨的中国孢粉数据库(Chinese Pollen Database, CPD),创建我国自主知识产权的数据库网站,并接入国际Neotoma古生态学数据库(<https://www.neotomadb.org/>)。除了第四纪末期地层花粉数据库之外,我们还将拓展时间尺度至深时(deep time),创建地质时期如新生代或更久远的地质时代的中国孢粉数据库。

希望我国从事古植物学、孢粉学、古生态学和古地理学的学者,能够积极参与到我国孢粉数据库的建设中,共享孢粉数据,为数据库及其网站建设献计献策,使得中国孢粉数据库能够真正建立起来,持续更新起来,并能走向国际舞台。同时,也希望广大学者积极行动起来,建设孢粉数据库之外的其他古环境演变代用指标的数据库,比如目前建设良好的地球古生物多样性数据库Geobiodiversity (<http://www.geobiodiversity.com>),以及尚未形成数据库的硅藻、植硅体、介形虫、考古植物和动物遗存等代用指标的收集和整理。多代用指标数据库的建立,将与孢粉数据库一起,从多视角重建地球古环境的演变过程,推动地球系统科学的不断前进和发展。

致谢 感谢多年来为中国孢粉数据库建设贡献数据、贡献计策和积极呼吁的国内外孢粉学同行。感谢中国科学院地球化学研究所杨华妹,浙江师范大学李晨瑜、陈娟、张书元等参与数值化、孢粉数据与文献整理。

参考文献

- Birks HJB, Heiri O, Seppä H, Bjune AE (2010). Strengths and weaknesses of quantitative climate reconstructions based on Late-Quaternary biological proxies. *The Open Ecology Journal*, 3, 68-110.
- Blaauw M (2010). Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5, 512-518.
- Blaauw M, Christen JA (2011). Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6, 457-474.
- Cao XY, Herzschuh U, Ni J, Zhao Y, Böhmer T (2015). Spatial and temporal distributions of major tree taxa in eastern continental Asia during the last 22 000 years. *The Holocene*, 25, 79-91.
- Cao XY, Ni J, Herzschuh U, Wang YB, Zhao Y (2013). A late Quaternary pollen dataset from eastern continental Asia for vegetation and climate reconstructions: set up and evaluation. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 194, 21-37.
- Cao XY, Tian F, Herzschuh U, Ni J, Xu QH, Li WJ, Zhang YR, Luo MY, Chen FH (2022). Human activities have reduced plant diversity in eastern China over the last two millennia. *Global Change Biology*, 28, 4962-4976.
- Chen HY, Xu DY, Liao MN, Li K, Ni J, Cao XY, Cheng B, Hao XD, Kong ZC, Li SF, Li XQ, Liu GX, Liu PM, Liu XQ, Sun XJ, *et al.* (2021). A modern pollen dataset of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 799-808. [陈海燕, 徐德宇, 廖梦娜, 李凯, 倪健, 曹现勇, 程波, 郝秀东, 孔昭宸, 李升峰, 李小强, 刘光琇, 刘平妹, 刘兴起, 孙湘君, 等 (2021). 中国现代花粉数据集. 植物生态学报, 45, 799-808.]
- Chevalier M, Davis BAS, Heiri O, Seppä H, Chase BM, Gajewski K, Lacourse T, Telford RJ, Finsinger W, Guiot J, Kühl N, Maezumi SY, Tipton JR, Carter VA, Brussel T, *et al.* (2020). Pollen-based climate reconstruction techniques for late Quaternary studies. *Earth-Science Reviews*, 210, 103384. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103384.
- Institute of Geographical Names, National Bureau of Surveying and Mapping (1994). *Gazetteer of China—An Index to the Atlas of the People’s Republic of China*. Sinomap Press, Beijing. [国家测绘局地名研究所 (1994). 中国地名录——中华人民共和国地图集地名索引. 中国地图出版社, 北京.]
- Davis BAS, Chevalier M, Sommer P, Carter VA, Finsinger W, Mauri A, Phelps LN, Zanon M, Abegglen R, Åkesson CM, Alba-Sánchez F, Anderson RS, Antipina TG, Atanassova JR, Beer R, *et al.* (2020). The Eurasian Modern Pollen Database (EMPD), version 2. *Earth System Science Data*, 12, 2423-2445.
- Harrison SP (2003). Contributing to global change science: the

- ethics, obligations and opportunities of working with palaeoenvironmental databases. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 57, 1-8.
- Herzschuh U, Li CZ, Böhmer T, Postl AK, Heim B, Andreev AA, Cao XY, Wieczorek M, Ni J (2022). LegacyPollen 1.0: a taxonomically harmonized global Late Quaternary pollen dataset of 2831 records with standardized chronologies. *Earth System Science Data*, 14, 3213-3227.
- Ni J, Cao XY, Jeltsch F, Herzschuh U (2014). Biome distribution over the last 22 000 yr in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 409, 33-47.
- Ni J, Chen Y, Herzschuh U, Dong D (2010). Late Quaternary pollen records in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1000-1005. [倪健, 陈瑜, Herzschuh U, 董丹 (2010). 中国第四纪晚期孢粉记录整理. *植物生态学报*, 34, 1000-1005.]
- Prentice IC, Webb III T (1998). BIOME 6000: reconstructing global mid-Holocene vegetation patterns from palaeoecological records. *Journal of Biogeography*, 25, 997-1005.
- Prentice IC, Jolly D, BIOME 6000 participants (2000). Mid-Holocene and glacial-maximum vegetation geography of the northern continents and Africa. *Journal of Biogeography*, 27, 507-519.
- Reimer PJ, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Blackwell PG, Ramsey CB, Brown DM, Buck CE, Edwards RL, Friedrich M, Grootes PM, Guilderson TP, Hafliadason H, Hajdas I, Hatté C, *et al.* (2013). Selection and treatment of data for radiocarbon calibration: an update to the international calibration (IntCal) criteria. *Radiocarbon*, 55, 1923-1945.
- Sun XJ, Song CQ, Chen XD (1999). "China Quaternary Pollen Database" (CPD) and "Biome 6000" project. *Advance in Earth Sciences*, 14, 407-411. [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.]
- The Angiosperm Phylogeny Group (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1-20.
- The Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences (2007). *Vegetation Map of the People's Republic of China (1:1000000)*. Geological Publishing House, Beijing. [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2007). 中华人民共和国植被图(1:1000000)说明书. 地质出版社, 北京.]
- Yu G, Chen XD, Ni J, Cheddadi R, Guiot J, Han HY, Harrison SP, Huang CX, Ke MH, Kong ZY, Li SF, Li WY, Liew PM, Liu GX, Liu JL, *et al.* (2000). Palaeovegetation of China: a pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *Journal of Biogeography*, 27, 635-664.
- Yu G, Prentice IC, Harrison SP, Sun XJ (1998). Pollen-based biome reconstructions for China at 0 and 6000 years. *Journal of Biogeography*, 25, 1055-1069.

特邀编委: 崔金中 责任编辑: 乔鲜果

附录 中国地层花粉数据集

Supplement A fossil pollen dataset of China

<https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2022.0316-D1.xlsx>