黑龙江省连环湖孢粉记录揭示的约 220 年的环境变化与人类活动*

王小丽^{1,2}, 肖海丰^{1**}, 肖霞云^{2**}

(1: 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 通过²¹⁰Pb 测年建立年代标尺, 利用黑龙江省连环湖阿木塔泡高分辨率的孢粉记录, 探讨了研究区约 220 年的环境变化与人类活动。研究表明, 1790—1820 AD 期间, 植被类型可能是以禾本科为主的草甸草原植被, 沙地类型以固定沙地为主, 气候相对较凉湿或环境几乎不受人类活动的破坏, 湖泊营养较丰富。1820—1930 AD 期间, 草甸草原植被中禾本科和菊科植物比例下降, 藜科和蒿属植物比例增加, 固定沙地减少、半固定沙地逐渐增加, 气候逐渐变干或可能伴随人类破坏环境的活动增强, 湿地面积减少。1930—1980 AD 期间, 针叶乔木松树比例有所增加, 草甸草原植被中菊科植物比例是 220 年来最高的, 藜科植物也略有增加, 而禾本科和蒿属植物比例下降, 推测此阶段固定沙地持续减少, 半固定沙地扩张到 220 年以来面积最大, 指示气候进一步变干且伴随着人类活动对自然环境的破坏强度增加, 湖泊湿地面积进一步减少。1980—2000 AD 期间, 草原植被中藜科植物的比例是 220 年以来最高的, 流动沙地面积明显增加, 湖泊湿地面积锐减, 结合气象数据, 得出此期的植被变化是由人类大范围围湖造田以及湿地水田化等活动导致的。2000—2010 AD 期间, 研究区周围以桦木/鹅耳枥属和栎属为主的落叶阔叶乔木比例增加, 草原植被中藜科和菊科植物比例是 220 年以来最低的, 揭示流动沙地和半固定沙地面积明显减少, 结合气象数据, 认为此期孢粉组合揭示的植被变化主要受人类退耕还草还林, 种植桦木/鹅耳枥属、榆属等阔叶植物以及在八支干渠建闸引水至连环湖等活动的影响。

关键词: 孢粉记录; 植被; 环境变化; 人类活动; 黑龙江省; 连环湖

Environmental changes and human activities over the last about 220 years revealed by the pollen record of Lake Lianhuan in Heilongjiang Province*

Wang Xiaoli^{1,2}, Xiao Haifeng^{1**} & Xiao Xiayun^{2**}

(1: Department of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, P.R. China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China)

Abstract: Based on the chronology established through the ²¹⁰Pb dating and the high-resolution pollen record of Amutapao in Lake Lianhuan, Heilongjiang Province, the environmental changes and human activities over the last about 220 years in the study area were discussed. The results showed that during 1790–1820 AD, the vegetation type was probably meadow steppe dominated by Poaceae, and the sandy type was mainly fixed sand. The climate was relatively cool and wet or the environment was hardly damaged by human activities, and lake was of relatively high nutrition. During 1820–1930 AD, the proportion of Poaceae and Compositae plants in the meadow steppe decreased, while that of Chenopodiaceae and *Artemisia* plants increased. The area of the fixed sand decreased, and the area of the semi-fixed sand gradually increased. The climate gradually became dry or it may be accompanied by the increased human activities, and the wetland area decreased. During 1930–1980 AD, the proportion of coniferous tree *Pinus* increased, and the proportion of Compositae plants in the meadow steppe was the highest in the past 220 years, and the proportion of Chenopodiaceae plants also increased slightly, while the proportion of Poaceae and *Artemisia* plants decreased. It is speculated that the fixed sand continued to shrink during this period, and the semi-fixed sand expanded to the largest area for the last about 220

* 2021-04-26 收稿; 2021-07-29 收修改稿。

国家重点基础研究发展计划项目 (2016YFA0600501)、国家自然科学基金项目 (41877434, 42077424, 40972115) 和哈尔滨师范大学预研项目 (11XYG-11) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: xiaohaifengdejie@ sina.com, xyxiao@ niglas.ac.cn.

years. It indicates that the climate became further dry and with the increased human activities, and the area of the wetland further decreased. During 1980–2000 AD, the proportion of the Chenopodiaceae plants in the steppe was the highest for the last about 220 years, the area of the mobile sand increased significantly, and the area of the wetland decreased sharply. Combined with the meteorological data, it was concluded that the vegetation changes in this period were caused by human activities such as large-scale lake reclamation and wetland paddy field. During 2000–2010 AD, the proportion of deciduous broad-leaved trees dominated by *Betula*/*Carpinus* and *Quercus* around the study area, and the proportion of Chenopodiaceae and Compositae plants in the steppe was the lowest in the last about 220 years, revealing a significant decrease in the areas of mobile sand and semi-fixed sand. Combined with the meteorological data, it is considered that the vegetation changes during this period revealed by the pollen assemblage were mainly influenced by humans returning farmland to grassland and forest, planting broad-leaved trees such as *Betula*/*Carpinus* and *Ulmus* et al., and building sluices in eight main canals to divert water to Lake Lianhuan.

Keywords: Pollen record; vegetation; environmental change; human activities; Heilongjiang Province; Lake Lianhuan

湖泊沉积由于具有连续性好、沉积速率快、分辨率高、信息量丰富等特点,能够很好地记录地质历史时期气候环境变化的信息;随着人类活动范围和强度的增加,人类对自然的改造能力逐渐增强,湖泊沉积也很好记录了包括自然环境变化和人类活动相互作用的演替过程^[1-6]。湖泊沉积物中的化石孢粉是重建过去植被与区域气候变化的重要代用指标之一^[7],同时也是揭示过去人类活动对景观影响的代用指标^[8]。松嫩平原地处我国北方典型农牧交错带,该区域生态环境较脆弱,易受气候变化和区域人类活动的影响,研究这一地区植被演替历史和古气候变迁对未来生态环境评价、农牧业发展、资源利用有着重要意义。然而,迄今对该区的植被演替和古气候变迁研究相对较少,仅早期夏玉梅等^[9]依据大庆、乾安、长春、哈尔滨等剖面对松嫩平原地区晚第三纪—更新世时期的孢粉组合特征、古植被与古气候演化进行了简要研究;汪佩芳等^[10]基于松嫩平原不同地点 6 个剖面的孢粉分析,进行了晚更新世以来古植被演替的初步研究;李取生^[11-12]基于松嫩沙地沙丘剖面的孢粉记录对全新世以来沙地古土壤发育时期的古植被景观进行了初步研究;李宜垠等^[13]以松嫩沙地泰来剖面、齐齐哈尔卧牛吐剖面和通榆开通剖面为研究对象研究晚更新世—全新世的古植被和古气候演变。这些早期的孢粉研究,分辨率相对较低,而且都是基于剖面进行的长或较长尺度的研究,对松嫩平原湖泊沉积记录的近几百年高分辨率的孢粉揭示的古气候与古植被演变以及人类活动变化研究几乎没有涉及。因此本文选择处于农牧交错带上的连环湖阿木塔泡作为研究点,通过湖泊沉积孢粉分析、现代气象数据与文献记载相结合,以此揭示松嫩平原地区的环境变化与人类活动影响的强度变化,这将对研究区未来生态环境评价、农牧业发展、资源利用有着重要意义,同时也进一步证实了孢粉研究在揭示百年、十年尺度上植被、气候与人类活动变化方面的可靠性。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

连环湖位于我国黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县(简称杜蒙县)的西部,处于松嫩沉降盆地中心最低处($46^{\circ}30' \sim 46^{\circ}50'N$, $123^{\circ}59' \sim 124^{\circ}15'E$),是由构造断陷形成的大型浅水湖泊,是黑龙江省最大的微咸水湖(图 1)。其由哈布塔泡、火烧黑泡、阿木塔泡、他拉红泡、敖包泡、牙门喜泡、牙门气泡、那什代泡、小尚泡等 20 个湖泊组成。湖泊总面积为 556.1 km^2 ,最大水深 4.6 m,平均水深 2.1 m,水位 139.0 m。湖区属温带大陆性半湿润气候,年均气温 4.0°C ,年降水量约 400 mm,6—8 月约占年降水量的 70%,蒸发量 1632 mm ^[14]。泰来气象站的气象数据展示了研究区 1958—2015 年近 60 年的年均温、年降水量和年均湿度的变化趋势(图 2)。连环湖的湖水依赖湖面降水和地表径流补给,主要入湖河流为乌裕尔河,上游有来自嫩江支流托力河口人工渠八一幸福河的水,北部有引嫩六支干渠头道桥和乌台北桥两个进水口引嫩江水入湖,无出流^[15]。研究区阿木塔泡($46^{\circ}33'35.5"N$, $124^{\circ}7'15.1"E$)位于连环湖的西南部(图 1)。

杜蒙县位于我国北方典型的农牧交错带上,植被类型主要有 3 大类,分别是草甸草原、沼泽草甸及草本沼泽,是东北西部典型草原地区^[16]。研究区植被为蒙古植物区系,属草甸草原植被。在沙地上生长的天然木本植物有榆树(*Ulmus pumila*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等,沿江长有灌木植物蒙古柳(*Salix linearistipularis*)、小黄柳(*Salix gordejewii* Chang et Skv.)等树种。人工林以杨树(*Populus* sp.)为主,其次为樟子松(*Pinus*

图 1 研究区地理位置
Fig.1 Geographical location of the study area

图 2 黑龙江省泰来气象站点 1958—2015 年之间的气候要素图
Fig.2 The climatic elements from 1958 AD to 2015 AD of Tailai Meteorological Station, Heilongjiang Province

syvestris var. *mongolica* Litv.)、锦鸡儿(*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehder)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)及山杏(*Armeniaca sibirica*)等。草本植物有羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.)、碱蓬(*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge)等。其中羊草分布最广,是优良的饲料。同时盛产防风(*Saposhnikovia divaricata* (Trucz.) Schischk.)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch)、桔梗(*Platycodon grandiflorus*)、知母(*Anemarrhena asphodeloides* Bunge)、柴胡(*Bupleurum Chinese*)、龙胆草(*Gentiana scabra* Bunge.)等药材 129 种^[17],湿地的水生植物有睡莲(*Nymphaea tetragona* Georgi)、金鱼草(*Antirrhinum majus*)、合子草(*Actinostemma lobatum* (Maxim.) Maxim.)、毒芹(*Cicuta virosa*)、球尾花(*Lysimachia thyrsoiflora*)、珍珠草(*Phyllanthus urinaria*)、千金子(*Euphorbia lathyris*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum* (Graebn.) Buch.)等 20 多种^[18],藻类优势种主要有项圈藻(*Anabaenopsis* sp.)、微胞藻(*Micromonas pusilla*)、盘星藻(*Pediastrum* sp.)、栅列藻(*Scenedesmus obliquus*)、十字藻(*Cnoderda apiculata*)等^[14]。连环湖周围的现代植被类型情况具体见图 3^[19]。

1.2 样品采集与实验方法

2010 年 8 月,利用重力采样器在连环湖阿木塔泡的湖心位置采集了 24 cm 未经扰动的柱状沉积岩芯

图 3 连环湖周围现代植被分布

Fig.3 Modern vegetation distribution around Lake Lianhuan

(AMT), 现场按 0.5 cm 间隔进行连续分样, 共获得 48 个样品. 样品密封保存后带回实验室后置于 4℃ 的冰箱中冷藏以备分析测试. 阿木塔泡沉积剖面的年代序列根据 ^{210}Pb 测年数据建立, 并选取 CRS 模式计算出样品的沉积速率和年代. 孢粉分析采用标准的氢氟酸法, 并用外加每片约 27637 粒石松孢子计算孢粉浓度, 用于孢粉分析的样品共 48 个, 每个样品至少鉴定 400 粒陆生花粉, 孢粉的数量用百分比和浓度表示, 百分比以陆生花粉总数为基数进行计算, 并用 Tilia 软件绘制孢粉百分比和浓度图.

2 结果

2.1 沉积物测年结果

本文的年代序列通过对放射性核素 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的比活度进行测试来获得. 因 ^{137}Cs 的测试结果显示其比活度表层最高, 往下逐渐降低, 不具有 1986 年和 1963 年的 ^{137}Cs 蓄积峰, 因此仅利用 ^{210}Pb 的测试结果来确定阿木塔泡沉积物的年代序列 (图 4). 考虑到近百年来沉积速率的非恒定性及沉积物的压实作用^[20-23], 本文采用恒定放射性通量模式 (CRS) 计算阿木塔泡沉积速率, 沉积岩芯深度与年代的对应关系如图 4c 所示. 根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测定的结果得出 Pb 的下限值在 20 cm 处, 使用 CRS 模式计算获得 0~20 cm 的平均沉积速率为 0.11 cm/a, 20 cm 处的年代为 1835 AD. 20 cm 以下沉积岩芯的年代采用沉积速率渐趋稳定后岩芯 (7~20 cm 之间) 的平均沉积速率来进行外推. 经计算, 沉积岩芯 24 cm 处的年代约为 1790 AD.

2.2 孢粉分析结果

在鉴定的 48 个孢粉样品中, 共统计鉴定 30745 粒孢粉, 分属 71 个类型 (科、属、种), 每个样品平均统计 640 粒, 最多统计 1304 粒, 最少统计 516 粒. 所鉴定的孢粉组合以陆生草本植物花粉为主, 百分比平均为 78.3% (65.3%~88.5%); 乔木花粉次之, 百分比平均为 20.5% (11.3%~34.0%); 灌木花粉较少, 平均为 1.2% (0.2%~2.5%); 有一定量水生 (或湿生) 草本和较多藻类, 百分比平均分别为 7.7% 和 17.0%, 少见蕨类孢子. 草本植物花粉有 38 个类型, 其中陆生草本植物花粉主要为藜科 (Chenopodiaceae)、蒿属 (*Artemisia*)、禾本科 (Poaceae)、菊科 (Compositae)、唇形科 (Lamiaceae) 等; 水生 (或湿生) 草本植物花粉主要为莎草科 (Cyperaceae) 和香蒲属 (*Typha*), 偶见狐尾藻属 (*Myriophyllum*). 木本植物花粉有 23 个类型, 其中乔木花粉主要为松属 (*Pinus*)、桦木/鹅耳枥属 (*Betula/Carpinus*) 和栎属 (*Quercus*), 其次还有桤木属 (*Alnus*) 和榆属 (*Ulmus*) 等; 灌木花粉主要为麻黄 (*Ephedra*), 少见柳 (*Salix*)、榛 (*Corylus*) 和沙棘 (*Hippophae*) 等. 蕨类较少见, 鉴定到 10 个类型; 藻类主要为盘星藻属 (*Pediastrum*), 平均为 17.0%.

根据孢粉组合的有序聚类分析 CONISS 的结果, 将整个剖面划分为 5 个孢粉组合带 (图 5). 各带的孢粉组合变化特征按由老到新的顺序简述如下:

图 4 连环湖沉积岩芯 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的比活度分布和 ^{210}Pb 年代—深度关系曲线

Fig.4 ^{210}Pb and ^{137}Cs activity versus depth and the ^{210}Pb age-depth curve in the sediment core of Lake Lianhuan

孢粉组合带 AMT-1 (24.0 ~ 21.3 cm, 1790—1820 AD): 带内陆生草本花粉含量非常高, 平均为 83.1% (81.2% ~ 85.9%), 以藜科占优势 (48.0%, 43.9% ~ 54.6%), 有较高含量的蒿属 (11.5%, 8.9% ~ 14.0%)、菊科 (9.1%, 6.1% ~ 11.6%) 和禾本科花粉 (10.4%, 6.0% ~ 14.6%), 而且禾本科花粉含量是整个剖面最高的. 有一定含量的乔木花粉, 平均为 16.2%, 以松属为主 (12.7%, 11.8% ~ 14.5%), 有少量桦木/鹅耳枥属 (平均为 2.7%). 水生 (或湿生) 草本花粉也有一定含量, 平均为 9.4%, 主要为莎草科 (平均为 6.6%) 和香蒲属 (平均为 2.6%). 藻类含量是整个剖面最高的 (平均为 38.7%), 主要是盘星藻属 (38.6%, 30.0% ~ 62.6%). 少见灌木花粉和蕨类孢子. 孢粉总浓度相对较高, 平均为 18091 粒/g. 蒿/藜 (A/C) 比值相对较小, 平均为 0.24 (0.16 ~ 0.32).

孢粉组合带 AMT-2 (21.3 ~ 15.8 cm, 1820—1930 AD): 与 AMT-1 带相比, 该带陆生草本花粉含量仍然非常高 (83.5%, 76.5% ~ 88.5%), 其中蒿属花粉含量明显增加 (16.8%, 12.6% ~ 23.9%), 藜科花粉含量略有增加 (50.4%, 44.4% ~ 56.2%), 而禾本科花粉含量明显减少 (6.4%, 4.1% ~ 10.7%)、菊科花粉含量有所降低 (7.5%, 4.4% ~ 9.3%), 其他变化不大. 乔木花粉、灌木花粉以及蕨类孢子含量相差不多. 水生 (或湿生) 草本花粉含量有所降低 (5.4%, 2.2% ~ 8.9%), 主要由莎草科 (平均为 3.7%) 和香蒲属 (平均为 1.6%) 含量降低导致. 藻类含量明显降低 (13.1%, 1.8% ~ 26.3%), 主要表现为盘星藻属含量的降低, 平均为 13.0%. 孢粉总浓度明显降低, 平均为 9513 粒/g. A/C 比值有所增加, 平均为 0.34 (0.23 ~ 0.54).

孢粉组合带 AMT-3 (15.8 ~ 9.3 cm, 1930—1980 AD): 与 AMT-2 带相比, 该带陆生草本花粉含量有所降低, 平均为 74.6% (66.8% ~ 82.1%), 其中蒿属 (5.2%, 2.9% ~ 9.2%) 和禾本科花粉 (3.7%, 1.4% ~ 6.7%) 含量明显降低, 而藜科含量进一步增加 (52.2%, 44.2% ~ 62.0%), 菊科花粉含量增加到整个剖面的最高值 (10.7%, 7.2% ~ 16.0%). 乔木花粉含量明显增加, 平均为 24.2% (16.3% ~ 31.8%), 主要由松属含量增加导致, 平均为 23.5%, 并且松属含量是整个剖面最高的. 灌木花粉 (平均为 1.2%) 和蕨类孢子 (平均为 1.1%) 含量稍有增加. 水生 (或湿生) 草本花粉含量稍有降低 (4.5%, 1.9% ~ 8.9%). 藻类含量有所增加 (平均为 15.9%), 波动较大 (1.4% ~ 28.9%). 孢粉总浓度和 A/C 比值都是整个剖面最低的, 平均分别为 3452 粒/g 和 0.10 (0.05 ~ 0.16).

孢粉组合带 AMT-4 (9.3 ~ 4.8 cm, 1980—2000 AD): 与 AMT-3 带相比, 该带陆生草本花粉含量有所增加 (81.4%, 78.4% ~ 84.1%), 主要表现为具有整个剖面最高含量的藜科花粉 (62.1%, 57.0% ~ 67.4%) 和唇形科花粉 (平均为 2.4%), 蒿属 (7.6%, 3.0% ~ 16.6%) 花粉含量有所增加, 而禾本科花粉含量降低至整个剖面的最低值 (平均为 1.3%), 菊科花粉含量也有所降低 (平均为 6.4%). 乔木花粉含量有所降低 (17.2%, 15.2% ~

图 5 连环湖阿木塔孢主要孢粉属种百分比和孢粉总浓度

Fig.5 The percentages of main pollen types and total pollen concentration of Amutapao in Lake Lianhuan

19.8%), 主要由松属含量降低导致, 平均为 15.6% (14.2%~17.4%)。灌木花粉、水生(或湿生)草本花粉、蕨类和藻类孢子含量相差不多。孢粉总浓度明显增加(平均为 18546 粒/g), 波动较大(在 1689~79803 粒/g 之间)。A/C 比值从下至上逐渐增加, 平均为 0.13 (0.05~0.29)。

孢粉组合带 AMT-5 (4.8 cm 以上, 2000—2010 AD): 该带陆生草本花粉含量明显降低, 平均为 71.1% (65.3%~74.8%), 是整个剖面最低的, 主要表现为藜科和菊科花粉是整个剖面最低的(平均含量分别为 38.4% 和 1.6%, 范围分别为 31.4%~46.1% 和 0~4.0%), 而蒿属花粉含量是整个剖面最高的, 平均为 25.0% (17.7%~31.9%), 禾本科含量相对上带略有增加, 平均为 2.6% (1.2%~4.2%)。乔木花粉含量有所增加, 平均为 27.4% (23.6%~34.0%), 主要表现为具有整个剖面最高含量的桦木/鹅耳枥属、栎属、桤木属和榆属等落叶阔叶乔木花粉, 平均分别为 14.7%、3.0%、0.8% 和 0.6%, 而松属花粉含量明显降低, 平均为 8.0% (4.6%~17.0%)。水生(或湿生)草本含量明显增加, 主要由莎草科花粉含量增加导致 (14.0%, 9.4%~19.0%), 香蒲属含量也有少许增加 (3.0%, 1.9%~4.8%)。灌木花粉和蕨类孢子含量相差不多。藻类含量有所降低, 平均为 9.9% (7.1%~15.1%)。孢粉总浓度明显降低, 平均为 7560 粒/g。A/C 比值明显增加至整个剖面的最高值, 平均为 0.67 (0.38~1.01)。

3 孢粉记录揭示的约 220 年的环境变化与人类活动

在 AMT 柱状岩芯中孢粉组合以陆生草本植物花粉占绝对优势, 主要为藜科、蒿属、菊科和禾本科, 木本花粉百分含量最高不超过 34.7%, 以松属为主, 反映了研究区周围约 220 年以来主要为草原植被景观, 在 2000 AD 以前, 木本植物种类和数量都少, 仅有一定量的松树和零星阔叶植物; 2000 AD 以来, 木本植物除松树数量减少外, 阔叶植物的种类和数量都明显增加。藜科和蒿属均是耐旱植物花粉, 产量高, 所反映的气候环境较干旱, 且当花粉含量大于 30% 时, 代表原位来源^[24-25]。在干旱、半干旱地区, 蒿属含量升高反映气候环境偏湿^[4]; 而藜科含量升高反映了气候环境偏干^[26]。因此, 当藜科和蒿属花粉含量此消彼长时, 可用蒿属和藜科花粉含量的比值(A/C)衡量空气湿度的相对程度^[27], 其比值越小, 反映气候环境越干。菊科和禾本科在草原植被组成中也是主要成分, 孙湘君等^[28]对中国北方部分科属花粉—气候响应面分析表明, 菊科花粉丰度的高值位于低温高湿区, 对湿度变化敏感, 随湿度的增大而增大; 禾本科花粉也具有低温高湿的高值区, 且随温度的降低、降水量的增高而增高。曹志伟等^[29]对嫩江沙地具有代表性意义的沙地类型植物群落的调查研究表明, 流动沙地植被以藜科植物为主, 半固定沙地植被以菊科植物为主, 固定沙地植被以禾本科为主, 对应草地的生态质量为差、较差、较好, 反映的气候对应为干旱、较干旱、较湿润, 或人类活动为环境破坏严重、环境破坏减弱、环境几乎没被破坏(或沙地环境得到改善)。

根据阿木塔泡沉积岩芯的孢粉组合特征, 将研究区过去约 220 年的环境变化分为以下 5 个阶段:

第 1 阶段 (1790—1820 AD): 本阶段陆生草本植物花粉含量非常高, 以藜科花粉含量占优势, 蒿属花粉含量也相对较高, 禾本科花粉含量是整个剖面最高的。虽然本阶段藜科和蒿属花粉占优势, 而禾本科花粉平均含量仅 10.4%, 但由于藜科和蒿属花粉具有超代表性, 它们是草原区所有样品孢粉组合中最主要的成分, 两者在孢粉组合中所占比例多大于 50%, 且人类活动越强或气候越干旱, 蒿属、藜科花粉所占百分比越高, 而禾本科花粉具低代表性, 即使是以禾本科为建群种的草原群落, 禾本科花粉所占比例也多低于 10%^[30]。因此本阶段孢粉组合反映的植被类型可能是以禾本科为主的草甸草原植被, 湖泊周围的沙地类型为以生长生态质量较好草地的固定沙地为主, 气候相对较凉湿且环境几乎不受人类活动的破坏, 这与本阶段较高的孢粉浓度反映湖泊周围草原生物量较高相一致。因湖泊周围的生物量较高, 在较强的水流作用下携带较丰富的营养成分到湖泊中, 进而可能导致本阶段高含量的盘星藻属。本阶段孢粉组合反映的环境变化、人类活动与该时期松嫩沙地基本没有大面积流动沙地^[31], 以及此期杜蒙县人口较少, 人类活动多以狩猎、游牧为主, 农业发展规模较小, 耕地面积有限, 环境相对较好^[32-33]相一致。

第 2 阶段 (1820—1930 AD): 本阶段藜科与蒿属花粉含量增加, 禾本科和菊科花粉含量减少; 水生(或湿生)草本植物花粉与藻类含量均降低。反映此阶段草甸草原植被中禾本科和菊科植物的比例下降, 藜科和蒿属植物比例增加, 推测固定沙地减少、半固定沙地逐渐增加, 气候逐渐变干或可能伴随人类破坏环境的活动增强, 湿地面积减少。根据文献记载, 杜尔伯特由于 1904 年后蒙旗地开放, 人口剧增, 从 1910 年的 3561 人增

至 1935 年的 51673 人,且在 1934 年耕地面积达到 8.68 万垧^[34]. 因此此期沙地变化除受气候变干影响外,还与清朝人口大量增加、人类改造自然的能力增强有紧密联系. 孢粉浓度降低指示陆生植物生物量降低,同时,此期岩芯的中值粒径较细,在浅水湖泊连环湖的阿木塔反映降水强度较弱,地表径流减小^[34-35],以致输入湖泊中的营养减少,盘星藻含量降低.

第 3 阶段(1930—1980 AD):本阶段乔木花粉含量增加,以松属花粉增加为主;陆生草本植物花粉含量有所降低,主要表现为禾本科和蒿属花粉含量降低,而藜科花粉含量有所增加,菊科花粉含量是整个剖面最高的;水生(或湿生)草本植物花粉含量降低;藻类含量有所增加. 反映此期研究区针叶乔木松树比例有所增加,草甸草原植被中菊科植物比例是 220 年来最高的,藜科植物也略有增加,而禾本科和蒿属植物比例下降,推测此阶段固定沙地持续减少,半固定沙地和流动沙地逐渐增加,而且半固定沙地是 220 年以来面积最大的,指示气候进一步变干且伴随着人类活动对自然环境的破坏强度增加,湖泊湿地面积进一步减少. 此期岩芯中的中值粒径明显较粗,应主要是受半固定沙地和流动沙地增加的影响^[35]. 离连环湖最近的泰来气象站自 1958 年以来的气象数据表明(图 2),1980 年以前年降水量较低、年均湿度具有降低趋势;同时,此期研究区周围人类开始大规模生产、油田开采和水资源大力开发,使湖泊湿地范围萎缩,水体受到污染以及草原植被退化^[18,36-37]. 本阶段孢粉组合反映的环境变化和人类活动与该时期的气候变化与人类活动强度变化具有很好的 consistency.

第 4 阶段(1980—2000 AD):本阶段藜科花粉含量是整个剖面最高的,禾本科花粉含量是整个剖面最低的,菊科花粉含量降低. 反映此阶段草原植被中藜科植物的比例是 220 年以来最高的,禾本科和菊科植物比例下降,推测此期固定沙地与半固定沙地面积减少,流动沙地面积明显增加,揭示气候可能进一步变干或人类活动对自然环境的改造和破坏程度持续增强,湖泊湿地面积锐减. 泰来气象站气象数据显示,此期年均温逐渐增加,年降水量和年均湿度较高,该结果与孢粉揭示的气候可能进一步变干相冲突,说明此期的植被变化是人类活动导致的,该阶段大范围围湖造田以及湿地水田化等人类活动导致松嫩沙地荒漠化现象加重^[36,38-39]. 此期孢粉含量波动较大,有 2 个样品出现峰值,推测可能与这 2 个样品的岩性较细有利孢粉保存有关,而不是反映真正的生物量增加,这两个样品岩性较细在粒度指标中具有很好的体现,即对应中值粒径的最低值^[35].

第 5 阶段(2000—2010 AD):本阶段乔木花粉含量增加,主要表现为具有整个剖面最高含量的桦木/鹅耳枥属、栎属、桤木属和榆属等落叶阔叶乔木花粉;陆生草本植物花粉含量有所下降,蒿属花粉含量是整个剖面最高的,禾本科花粉含量有所增加,藜科和菊科花粉含量是整个剖面最低的;水生(或湿生)草本植物花粉含量明显增加,A/C 比值明显增加至整个剖面的最高值. 反映此阶段研究区周围以桦木/鹅耳枥属和栎属为主的落叶阔叶乔木比例增加,草原植被中藜科和菊科植物比例是 220 年以来最低的,禾本科植物比例略有增加,推测该阶段流动沙地和半固定沙地面积明显减少,区域气候偏温湿或人类活动对自然环境进行改善,湿地面积增加. 泰来气象站气象数据表明,此期年均温高、年降水量和年均湿度低,孢粉组合反映的气候与气象数据结果相反,说明此期的植被变化完全是受人类活动的控制. 此期人类活动表现为退耕还草还林,种植桦木/鹅耳枥属、榆属等阔叶植物,流动沙地面积持续缩减;在八支干渠建闸引水至连环湖,使湖泊、湿地面积增加,为莎草科、芦苇等湿生、水生草本植物提供更广阔的生长场所,并使湖泊流域内生态环境得到改善^[38,40],此时人类活动正面地影响了研究区的植被组成.

4 结论

根据黑龙江省连环湖阿木塔泡 24 cm 长沉积岩芯的高分辨率孢粉分析,推测该研究区过去约 220 年以来的环境变化分为 5 个阶段:1790—1820 AD 期间,孢粉组合反映的植被类型可能是以禾本科为主的草甸草原植被,湖泊周围的沙地类型为以生长生态质量较好草地的固定沙地为主,气候相对较凉湿且环境几乎不受人类活动的破坏,湖泊营养较丰富. 1820—1930 AD 期间,孢粉组合反映草甸草原植被中禾本科和菊科植物比例下降,藜科和蒿属植物比例增加,固定沙地减少、半固定沙地逐渐增加,气候逐渐变干或可能伴随人类破坏环境的活动增强,湿地面积减少. 1930—1980 AD 期间,孢粉组合反映研究区针叶乔木松树比例有所增加,草甸草原植被中菊科植物比例是 220 年来最高的,藜科植物也略有增加,而禾本科和蒿属植物比例下

降,推测此阶段固定沙地持续减少,半固定沙地和流动沙地逐渐增加,而且半固定沙地是220年以来面积最大的,指示气候进一步变干且伴随着人类活动对自然环境的破坏强度增加,湖泊湿地面积进一步减少。1980—2000 AD期间,孢粉组合反映草原植被中藜科植物的比例是220年以来最高的,禾本科和菊科植物比例下降,推测此期固定沙地与半固定沙地面积减少,流动沙地面积明显增加,湖泊湿地面积锐减,结合气象数据,得出此期的植被变化是由人类大范围围湖造田以及湿地水田化等活动导致的。2000—2010 AD期间,研究区周围以桦木/鹅耳枥属和栎属为主的落叶阔叶乔木比例增加,草原植被中藜科和菊科植物比例是220年以来最低的,禾本科植物比例略有增加,揭示流动沙地和半固定沙地面积明显减少,结合气象数据,认为此期孢粉组合揭示的植被变化主要受人类退耕还草还林,种植桦木/鹅耳枥属、榆属等阔叶植物以及在八支干渠建闸引水至连环湖等活动的影响。研究区孢粉组合反映的植被变化快速地响应于气候和人类活动的变化,并且揭示自1980年以来人类活动对植被的影响强度超出了气候变化,这与研究区人类活动的强度变化是完全一致的,进一步证实了化石孢粉在短尺度研究中的可靠性。

5 参考文献

- [1] Wang SM, Zhang ZK. New progress in the study of lake sediment and environmental evolution in China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(6): 579-587. [王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 1999, **44**(6): 579-587.]
- [2] Chen BS, Zheng Z, Huang KY *et al.* Sedimentation rate and environmental reconstruction based on grain-size and pollen-spores analysis from Huangdong Reservoir, Huizhou. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(10): 1259-1267. [陈碧珊, 郑卓, 黄康等有. 惠州黄洞水库沉积速率及孢粉的环境指示意义. 地理科学, 2013, **33**(10): 1259-1267.]
- [3] Guo YY, Mao LJ, Mo DW *et al.* Vegetation dynamics and human activities over the past 1300 years revealed by pollen record at the Tongguan kilns, lower Xiangjiang River, China. *Quaternary International*, 2021, **577**: 139-146. DOI: 10.1016/j.quaint.2020.09.023.
- [4] Xiao XY, Yang XD, Shen J *et al.* Sporopollen record and environmental evolution since ~100 years in lake Hongjiannao, Shaanxi Province. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 28-34. DOI: 10.18307/2005.0105. [肖霞云, 羊向东, 沈吉等. 陕西红碱淖近百年来来的孢粉记录及环境变化. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 28-34.]
- [5] Jia TF, Gao X, Wang F. Significance of pollen and charcoal characteristics to the oxbow environmental change events at Jingzhou the Yangtze River in recent 100 years—a case study of Tian'e and Chiba Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(10): 1630-1640. [贾铁飞, 高鑫, 王峰. 近百年来长江荆江段牛轭湖沉积的孢粉、炭屑特征及其环境意义——以天鹅洲、尺八湖为例. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(10): 1630-1640.]
- [6] Chen YY, Chen SY, Liu JZ *et al.* Environmental evolution and hydrodynamic process of Dongping Lake in Shandong Province, China, over the past 150 years. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(1): 69-75. DOI: 10.1007/s12665-012-1716-x.
- [7] Han DX, Gao C, Li YH *et al.* Potential in paleoclimate reconstruction of modern pollen assemblages from natural and human-induced vegetation along the Heilongjiang River basin, NE China. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**: 141121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141121.
- [8] Li YY, Zhou LP, Cui HT. Sporopollen indicators of human activities. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(9): 991-1002. [李宜垠, 周力平, 崔海亭. 人类活动的孢粉指示体. 科学通报, 2008, **53**(9): 991-1002.]
- [9] Xia YM, Wang PF. The paleobotany and paleoclimate in the Songnen plain; A study on the late tertiary-Pleistocene spore pollen assemblages. *Acta Geographica Sinica*, 1987, **42**(2): 165-178. [夏玉梅, 汪佩芳. 松嫩平原晚第三纪—更新世孢粉组合及古植被与古气候的研究. 地理学报, 1987, **42**(2): 165-178.]
- [10] Wang PF, Xia YM. Preliminary research of vegetational succession on the Song-Nen plain since late Pleistocene. *Bulletin of Botanical Research*, 1988, **8**(1): 87-96. [汪佩芳, 夏玉梅. 松嫩平原晚更新世以来古植被演替的初步研究. 植物研究, 1988, **8**(1): 87-96.]
- [11] Li QS. A preliminary study on the historical evolution of Songnen Sandy Land. *Chinese Science Bulletin*, 1990, **35**(11): 854-856. [李取生. 松嫩沙地历史演变的初步研究. 科学通报, 1990, **35**(11): 854-856.]
- [12] Li QS. The formation of Songnen sandy land and the changes of the environment. *Journal of Desert Research*, 1991, **11**(3): 36-43. [李取生. 松嫩沙地的形成与环境变迁. 中国沙漠, 1991, **11**(3): 36-43.]

- [13] Li YY, Lu JF. The sporo pollen records and vegetation and climate history in Songnen sandy land since epipleistocene. *Journal of Desert Research*, 1996, **16**(4): 338-344.[李宜垠, 吕金福. 松嫩沙地晚更新世以来的孢粉记录及古植被古气候. 中国沙漠, 1996, **16**(4): 338-344.]
- [14] Wang SM, Dou HS eds. Lakes of China. Beijing: Science Press, 1998: 504-506. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 504-506.]
- [15] Li J, Zang SY, Song YS *et al.* Speciation analysis of heavy metals in sediment from amuta lake of Lake Lianhuan. *Environmental Science and Management*, 2009, **34**(1): 37-41.[李晶, 臧淑英, 宋延山等. 连环湖阿木塔泡沉积物中重金属形态及其对环境影响分析. 环境科学与管理, 2009, **34**(1): 37-41.]
- [16] Bai SY, Zhang SW. A study on the spatial-temporal land use conversion in County region—taking duerbete County as an example. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, **19**(1): 67-70.[白淑英, 张树文. 县域土地利用/土地覆被时空转换研究——以杜尔伯特蒙古族自治县为例. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(1): 67-70.]
- [17] Xu LJ, Feng DJ, Xu CL. Study on the status and development countermeasures of desertification land in dumeng County. *Forest Investigation Design*, 2011, (2): 33-36.[宿利军, 冯德江, 徐长利. 杜蒙县沙化土地现状及发展对策. 林业勘查设计, 2011, (2): 33-36.]
- [18] Du CY, Feng XY, Wang YG *et al.* Investigation on the ecological environment of the duerbert wetland. *Heilongjiang Meteorology*, 2005, **22**(4): 11-13.[杜春英, 冯秀云, 王育光等. 杜尔伯特湿地所在区域生态环境的调查. 黑龙江气象, 2005, **22**(4): 11-13.]
- [19] Editorial Board of Chinese Vegetation Map, Chinese Academy of Sciences. Vegetation Atlas of China. Beijing: Science Press, 2001: 211. [中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001: 211.]
- [20] Liu EF, Yang XD, Shen J *et al.* Sedimentary flux of Lake Taibai, Hubei Province and correlations with precipitation and human activities in its catchment during the last century. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 407-412. DOI: 10.18307/2007.0408. [刘恩峰, 羊向东, 沈吉等. 近百年来湖北太白山湖沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 407-412.]
- [21] Zhai ZL, Wang GP, Liu JS. ^{210}Pb and ^{137}Cs dating and modern sedimentation rate in the Wulanpao marsh, Inner Mongolia autonomous region. *Wetland Science*, 2005, **3**(4): 269-273.[翟正丽, 王国平, 刘景双. 乌兰泡沼泽的 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率. 湿地科学, 2005, **3**(4): 269-273.]
- [22] Yi CL, Liu HF, Rose NL *et al.* Sediment sources and the flood record from Wanghu Lake, in the middle reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2006, **329**(3/4): 568-576. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.008.
- [23] Ding ZY, Yang H, Xie B *et al.* Effects of hydraulic engineering applications on recent sedimentation rates in Nansi lake. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(2): 242-249.[丁兆运, 杨浩, 谢标等. 水利工程对南四湖现代沉积速率的影响. 环境科学研究, 2015, **28**(2): 242-249.]
- [24] Wu FL, Fang XM, Ma YZ *et al.* A 1.5 Ma sporopollen record of paleoecologic environment evolution in the central Chinese Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(3): 295-302. DOI: 10.1007/BF03182815.
- [25] Tong XF, Xiao XY, Yang XD *et al.* Climatic changes and human activities revealed by pollen records in Lake Taibai, Hubei Province, the middle and lower reaches of the Yangtze River region over the past 1500 years. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 732-740. DOI: 10.18307/2009.0519.[全秀芳, 肖霞云, 羊向东等. 湖北太白山湖孢粉记录揭示的近 1500 年以来长江中下游地区的气候变化与人类活动. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 732-740.]
- [26] Yan QY, Wang L, Zhang Y *et al.* Changes in vegetation and environment in the *Betula microphylla* wetland of Ebinur Lake in Xinjiang, China since 3900 cal. aBP. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2): 486-494. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202102.007.[延琪瑶, 王力, 张芸等. 新疆艾比湖小叶桦湿地 3900 年以来的植被及环境演变. 应用生态学报, 2021, **32**(2): 486-494.]
- [27] Tang LY, Shen CM, Li CH *et al.* Pollen recorded vegetation and environment in central Qinghai Xizang Plateau since middle Holocene. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2009, **39**(5): 615-625.[唐领余, 沈才明, 李春海等. 花粉记录的青藏高原中部中全新世以来植被与环境. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2009, **39**(5): 615-625.]
- [28] Sun XJ, Wang BY, Song CQ. Pollen climate response surface analysis of some families and genera in northern China. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 1996, **26**(5): 431-436.[孙湘君, 王琰瑜, 宋长青. 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, 1996, **26**(5): 431-436.]
- [29] Cao ZW, Zhang YZ, Wang HY *et al.* Growth process and features of sand dune vegetation in sand tract in Menggu auto-

- mous County. *Protection Forest Science and Technology*, 2005, (4): 51-53. [曹志伟, 张玉柱, 王红艳等. 杜尔伯特蒙古族自治县沙地沙丘植被发育过程及其特征. 防护林科技, 2005, (4): 51-53.]
- [30] Li YC, Xu QH, Yang XL *et al.* Pollen assemblages of major steppe communities in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 555-564. [李月丛, 许清海, 阳小兰等. 中国草原区主要群落类型花粉组合特征. 生态学报, 2005, **25**(3): 555-564.]
- [31] Li BL. The climatic factors of desertification and the developed characteristic of Songnen sandy land. *Journal of Desert Research*, 1996, **16**(3): 253-258. [李宝林. 松嫩沙地沙漠化的气候因素与沙地发育特征. 中国沙漠, 1996, **16**(3): 253-258.]
- [32] Sun QZ, Zang SY, Xiao HF. Modern sedimentation rates and dry-humid change inferred from grain size records in Lake Li-anhuan of Heilongjiang Province. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, **29**(3): 119-124. [孙清展, 臧淑英, 肖海丰. 黑龙江连环湖近现代沉积速率及粒度反映的气候干湿变化. 地理与地理信息科学, 2013, **29**(3): 119-124.]
- [33] Bai SY, Zhang SW, Zhang YZ. Analyzing dynamic process of land use change in Songnen plain of China: A case study in Duerbote Mongolian autonomous County of Daqing City. *Resources Science*, 2007, **29**(4): 164-169. [白淑英, 张树文, 张养贞. 松嫩平原土地利用/覆被变化的动态过程分析——以大庆市杜尔伯特蒙古族自治县为例. 资源科学, 2007, **29**(4): 164-169.]
- [34] Local chronicle Compilation Committee of Duerbote Mongolian Autonomous County ed. Duerbote Mongolian Autonomous County Lakes of China. Harbin: Heilongjiang People's Publishing House, 1996: 138-170. [杜尔伯特蒙古族自治县地方志编纂委员会. 杜尔伯特蒙古族自治县志. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1996: 138-170.]
- [35] Li QF, Xiao HF, Wang BL. Distribution characteristics of pollution from nitrogen and phosphorus in sediments from Amuta Lake. *Environmental Science and Management*, 2021, **46**(3): 58-63. [李秋凤, 肖海丰, 王百灵. 阿木塔泡沉积物营养盐演化特征与沉积记录研究. 环境科学与管理, 2021, **46**(3): 58-63.]
- [36] Du HS, Wang LY, Chen ZW *et al.* Distribution of lakes in Songnen sandy land for 5 periods since 1980 and their changes. *Wetland Science*, 2018, **16**(3): 352-356. [杜会石, 王良玉, 陈智文等. 1980年以来5个时期松嫩沙地湖泊群分布及其变化研究. 湿地科学, 2018, **16**(3): 352-356.]
- [37] Yi Y. Study on the protection of ecological environment during the exploitation of Daqing Oilfield [Dissertation]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014. [伊勇. 大庆油田开采过程中生态环境保护的研究[学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2014.]
- [38] Wang LY, Du HS. Dynamic evolution and simulation prediction of aeolian vegetation in Songnen sandy land in recent 35 years. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(4): 380-385. [王良玉, 杜会石. 近35年松嫩沙地风沙-植被动态演变及模拟预测. 水土保持研究, 2018, **25**(4): 380-385.]
- [39] Huang F, Zhang SW, de Jan L *et al.* Wetland changes in the middle and lower Wuyuer River, Songnen plain since the 1970s. *Journal of Natural Resources*, 2006, **21**(6): 949-956. [黄方, 张树文, de Jan Leeuw等. 20世纪70年代以来松嫩平原乌裕尔河中下游流域的湿地演变. 自然资源学报, 2006, **21**(6): 949-956.]
- [40] Cui GY. Investigation on situation of lake bog wetlands in Durham County. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2020, **48**(7): 44-47. [崔国玉. 杜尔伯特县湖泊沼泽湿地的情况调查研究. 黑龙江水利科技, 2020, **48**(7): 44-47.]