石羊河流域早全新世湖泊孢粉记录及其环境意义

朱 艳[①②] 陈发虎[②] B. D. Madsen[②③]

(①西北师范大学地理与环境学院, 兰州 730070; ②兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; ③Utah Geology Survey, Salt Lake City, UT 84114, USA. E-mail: yzhu@lzu.edu.cn)

摘要 三角城剖面全新世早期地层中 85 个样(分辨率为 40~50 年)孢粉分析显示: 孢粉组合中针叶树含量高达 50%以上, 以云杉属、圆柏属为主, 两者之和达 40%~60%左右, 且含量互为消长. 同流域其他湖相地层也有类似现象. 通过对云杉属、圆柏属生态习性、传播性能、与其他组分的数量关系及表土花粉分析, 认为孢粉组合中的云杉属、圆柏属等主要成分并不指示当地的植被状况, 而指示流域上游祁连山山上的植被状况; 云杉属和圆柏属含量与区域有效湿度关系密切, 云杉属丰值指示湿润, 圆柏属丰值指示干旱. 并用该模式重建了石羊河流域全新世早期的环境演化过程.

关键词 湖泊孢粉记录 环境意义 石羊河流域 早全新世 环境重建

西部干旱区湖泊孢粉记录是研究欧亚大陆中部地区生态环境对全球变化响应的最佳指标之一, 但是西部干旱区的内陆湖泊多是由发源于高海拔山地的河流补给的开放湖泊[1]. 与封闭湖泊相比, 开放湖泊孢粉组合的环境意义已非常复杂[2~4]; 但在干旱区, 大风和暂时性洪流是极常见的自然现象, 它们可将大量的外来花粉带到沉积区, 而干旱区当地孢粉产量极低, 这使得干旱区开放湖泊孢粉记录的环境指示意义更加复杂[5]. 所以, 对这类湖泊孢粉记录环境指示意义的研究, 不仅可以为干旱区开放湖泊沉积物孢粉记录古环境重建提供一个合理的、正确的解释, 也是对全球变化研究内容的丰富.

石羊河尾闾湖泊位于夏季风的尾闾与西风的交界区, 对环境变化非常敏感. 石羊河流域晚第四纪环境演化研究程度较高[6~8], 这为本文提供了进一步研究的基础.

1 流域概况

石羊河流域位于祁连山东段北侧, 其南部为祁连山地, 中部为洪积平原和戈壁, 北部为低山丘陵、冲积平原和沙漠. 南部山区为凉温带半干旱气候, 中北部为温带干旱气候. 流域内植被具有很强的地带性[9,10](图 1). 石羊河发源于祁连山东段的冷龙岭北坡, 集水面积 1.1×10^4 km^2. 1950~1979 年出山口的年均径流量为 13.363×10^8 m^3, 晚更新世以来曾在民勤盆地形成统一的尾闾湖泊[6]. 在人为作用的影响下, 湖泊于 20 世纪 50 年代干涸.

2 工作方法

三角城剖面为一探槽剖面, 海拔 1320 m, 厚 7 m, 由亚黏土、细粉砂夹多层灰黑色低成熟度的泥炭层组成. 剖面沉积连续. 9 个块样 ^{14}C 年龄和 3 个碳屑和孢粉 AMS ^{14}C 年龄确定: 地层时代为末次冰消期到全新世, 具体数值及其校正、转换方法陈发虎等人[11]已有报道. 作者对剖面 292~460 cm (^{14}C 年龄为 10~6.3 kaBP)段进行了孢粉分析, 取样间距为 2 cm, 每样的理论分辨率为 40~50 年左右. 样品先用 HCl 去钙, 再用 HF 脱硅, 后用超声波清洗器筛滤(网布孔径 6 μm). 每样统计 300 粒以上, 最多一个样统计到 1789 粒.

3 孢粉分析结果

共鉴定出 50 余个科属, 常见的有 20 余个科属. 总的来说, 孢粉组合较单调. 针叶树是孢粉组合中的主要成分, 占孢粉总数的 50%~60%左右, 个别样占到 70%~80%(图 2), 以云杉属(*Picea*)和圆柏属(*Sabina*)为主, 另有适量的松属(*Pinus*)等. 阔叶树占 5%~25%, 主要为桦木(*Betula*)、榆(*Ulmus*)、栎(*Quercus*)和柳(*Salix*)等属. 灌木占 1%~10%左右, 主要为蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Leguminosae)、榛属(*Corylus*)、鼠李科(Rhamnaceae)和柽柳科(Tamaricaceae)等. 草本占 5%~20%, 主要为禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)、藜科(Chenopodiaceae)、蒿属(*Artemisia*)、蓼属(*Polygonum*)和莎草科(Cyperaceae)等. 干旱植物(因研究区在干旱区, 故本文的干旱植物仅包括白刺、沙拐枣等极度旱生植物)以白刺属(*Nitraria*)为主, 含量最高可达 7%. 某些层段中有 1%~3%的水生植物, 主要为香蒲属(*Typha*). 蕨类占 10%左右, 个别层位占 20%~40%, 主要为卷柏(*Selaginella*)和水龙骨(*Polypodium*)等属.

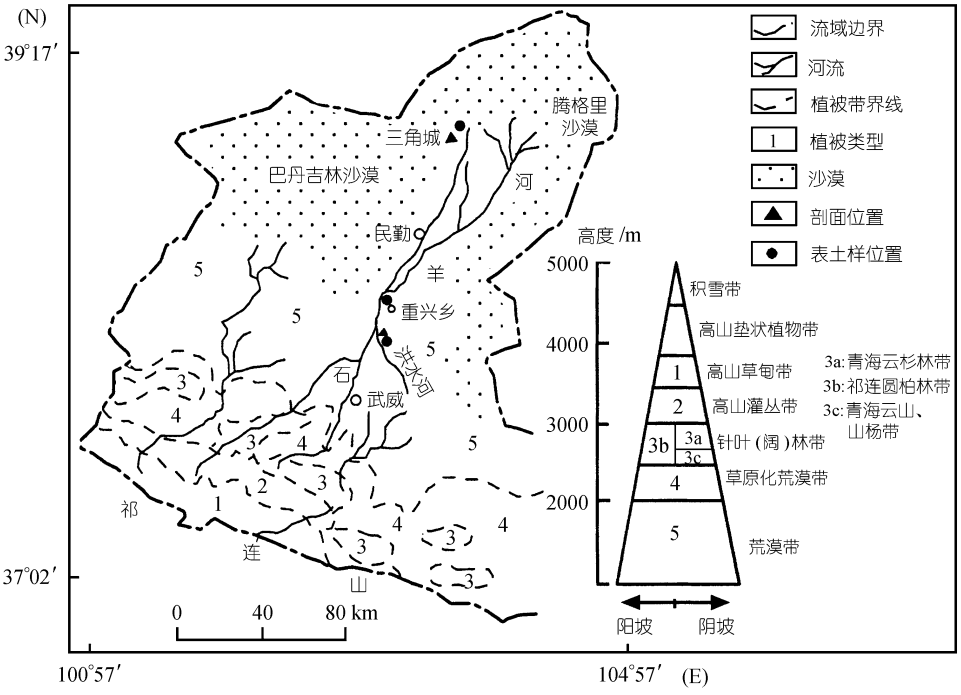

图 1 石羊河流域地理位置

4 湖相地层孢粉组合的环境意义

三角城剖面孢粉组合中针叶树百分比高达 50% 以上, 总体反映森林景观, 与现在当地荒漠植被完全不同. 该流域中游石羊河的一个小支流洪水河(图 1)在即将入干流处的洪水河剖面孢粉组合也出现类似的情况[7](图3). 洪水河剖面下部 1~2 段冲洪积相地层中以藜科和蒿属为主, 上部 3~5 段湖相地层中针叶树花粉的含量相当高, 多数都在 50%以上. 洪水河剖面海拔 1460 m, ^{14}C 年龄确定地层的时代为 8~3 kaBP[7].

三角城剖面和洪水河剖面上部湖相地层孢粉组合中针叶树花粉含量都非常高, 是否说明 10~6.3 和 5~3 kaBP 时段, 石羊河流域下、中游地区曾为一片森林? 该流域中、下游干旱大格局早已形成, 上游现代针叶林下限的海拔高度为 2500 m, 目前所有研究还没有发现我国西北地区全新世环境有如此巨大的变化, 可使林线从 2500 m 降至 1500~1300 m. 这种情形为何出现? 三角城剖面孢粉分析显示: 组合中最主要的成分是云杉属和圆柏属, 这两者之和占到每个样品孢粉总数的 40%~60%, 个别到 80%, 且两者含量互为消长(图 2). 重点分析这两者的环境意义可解释整个剖面孢粉组合的环境意义.

4.1 云杉属的环境指示意义

风媒环境云杉属花粉的传播能力是极有限的, 绝大部分落在母体周围[12,13] . 所以按常规概念, 三角城剖面高含量的云杉花粉, 应指示剖面附近曾有云杉林的存在. 但这个结论会得出林线将从海拔 2500 m 下降至海拔 1300 m 的结论(按现代植被分布推断). 按每 100 m 0.6℃的温度递减率推算, 降温幅度高达 6~7℃左右, 若考虑湿度增加的影响, 降温幅度要稍小一些, 即使如此, 全新世如此大的降温也是不可能的. 需另辟思路予以解释.

三角城剖面孢粉组合中云杉属含量与孢粉浓度、植被复杂分异度、水生植物和蕨类含量成正比, 与干旱植物百分比成反比. 云杉林现代分布区的地理条件[10]表明云杉属是喜冷湿的. 云杉属花粉-气候响应面分析结果[14]显示: 在流域上游祁连山区气候条件下, 云杉属花粉丰度的增加是湿度增加的结果. 三角城剖面中云杉属浓度高的层位对应地层中粒度较细的湖相层, 即云杉属多时, 湖泊最发育, 流域来水最多. 这些结果都显示云杉属与有效湿度关系密切. 加之剖面处于半开放流域尾闾湖的边缘, 尾闾湖接受源于祁连山的河流来水, 现代祁连山的产流区主要集中在针叶林带, 不难设想径流形成过程将祁连山

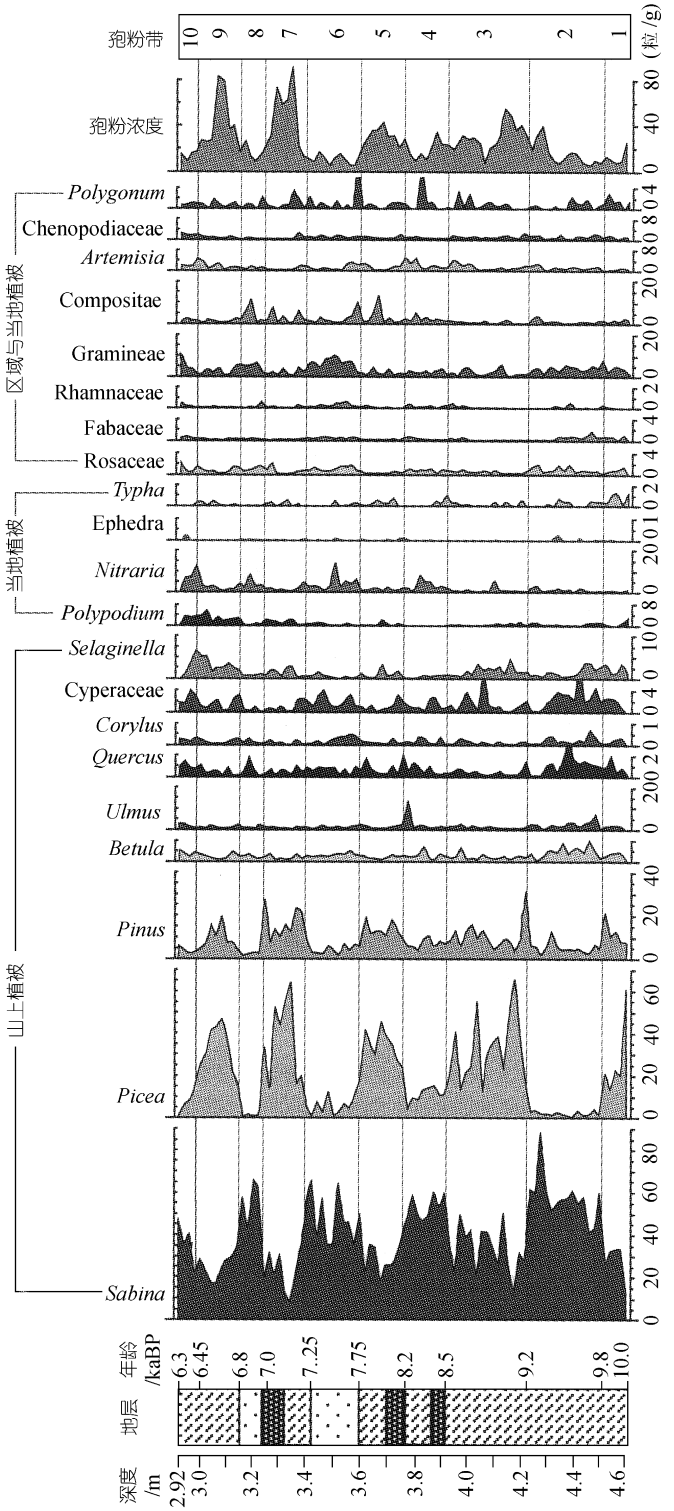

图 2 三角城剖面孢粉图式(%)

依据剖面处和整个流域现代植被的分布状态划分了孢粉组. 因水生植物花粉含量较低, 故孢粉百分比按全部孢粉种属计算

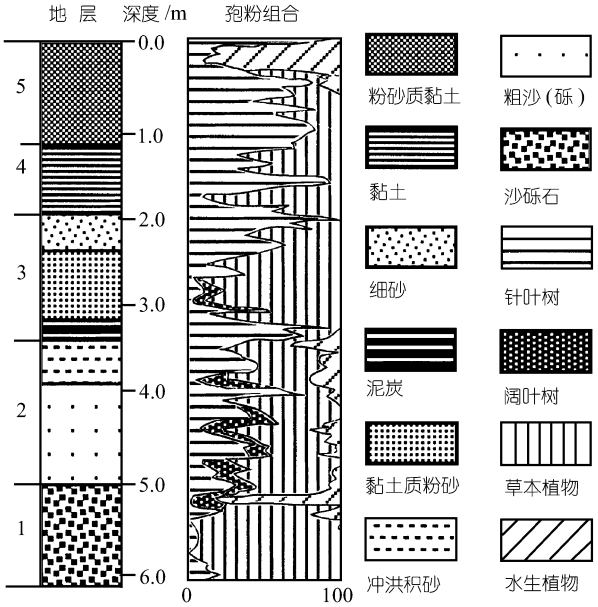

图 3 洪水河剖面地层与孢粉组合(据文献[7])

山上的云杉属花粉作为沉积物的一部分, 搬运到尾闾区沉积. 有关研究已证实: 流水搬运花粉的能力是非常强的[15,16]; 河流静水区、缓水区是孢粉沉积的主要环境[16]. 石羊河流域从针叶林下限的海拔 2500 m 到剖面处的海拔 1300 m, 水平距离仅 250 km 左右, 如此大的比降只有尾闾区具备静流、缓流的条件, 尾闾区是孢粉的主要沉积区.

为了验证这个想法, 作者于 2000 年 4 月初和 7 月上、中旬, 在石羊河及其主要支流分别取水样、现代河床沉积物样和河床外的表土样进行孢粉分析. 30 个水样和 94 个河床样及表土样的分析结果(详细结果另文专述)表明: 石羊河下游干旱区内, 同一地点河床外表土中云杉花粉含量远远低于河水和河床表层沉积物中云杉花粉含量(表 1). 这个结果支持上述想法.

另外, 这个想法可合理地解释洪水河剖面湖相地层中针叶树花粉含量奇高的现象, 避免了常规方法仅从孢粉组合角度出发得出石羊河流域中游地区中、晚全新世发育针叶林[7], 即温度降低 5~6℃这个不可能出现的结论. 洪水河发源于山前洪积扇, 祁连山上植物花粉可被洪水带入洪水河(表 2). 洪水河剖面下部冲积相发育时, 径流非常强, 剖面处于一个可吞吐的开放环境, 强劲的径流可将部分来自上游的花粉和当地花粉与沉积物一起冲进干流, 孢粉组合可能缺失一部分, 即孢粉在此发生了沉积分选. 据前人的研究, 缺失的部分以针叶树为主, 冲积相中菊科和藜科多[17~20], 这与洪水河剖面下部冲积相地层中藜科和蒿属多的结果是一致的. 上部湖相地层发育时, 原来径流通畅的河道在其终端开始滞水, 形成类似尾闾湖的滞水洼地或湖泊. 山上来水要么经湖泊进入干流, 要么入湖后停滞. 无论哪种情况, 山上以针叶树花粉为主的花粉沉积在湖泊中, 使上部湖相地层孢粉组合中针叶树花粉含量大增.

综上分析, 作者认为, 三角城剖面中高含量的云杉属花粉主要是石羊河搬运的结果, 并不代表当地的植被, 它的变化应指示流域山上植被和气候变化, 它的变化和区域的有效湿度关系更密切, 它的丰值, 指示有效湿度的丰值.

4.2 圆柏属的指示意义

剖面中高含量的圆柏属花粉与云杉属一样, 主要来自山地. 圆柏属较云杉属耐旱寒、瘠薄, 对环境要求不严, 生境较干旱[10], 该流域上游海拔 2500~3100 m 的山地阳坡有纯林分布. 剖面孢粉组合中圆柏属的百分比与云杉属、水生植物、蕨类植物百分比、孢粉浓度和分异度成反比, 与干旱植物百分比成正比. 圆柏属的丰值对应地层中粒度较粗的细粉沙层, 说明圆柏属丰值段是湿度下降, 生物种类和总量下

表 1 石羊河流域下游不同地点、样品中云杉花粉含量

地点(见图 1)	经纬度	距林线距离/km	水样	河床内洪积物	(河床外)表土
洪水河大桥下北岸	38° 12′ 06″ N, 102° 46′ 20″ E	135	21.8%	49.5%	5.1%
重兴乡西石羊河边	38° 21′ 30″ N, 102° 48′ 54″ E	145	8.9%	37.1%	2.0%
尾闾区三角城剖面	39° 00′ 38″ N, 103° 20′ 25″ E	250	无河流, 未取样		1.6%

表 2 洪水河桥处 3 种样品孢粉组合中主要成分(%)

样品	云杉	松属	圆柏	胡颓子科	禾本科	菊科	蒿属	藜科	莎草科	蓼属	白刺属	蒺藜属
水样	21.4	13.4	2.2	0.0	18.8	13.4	6.5	5.1	4.0	2.2	2.2	1.4
河床样	49.5	22.3	1.1	0.3	3.2	10.5	0.5	1.9	0.3	1.0	1.9	1.6
河床外表土	5.1	8.1	0.3	19.1	5.5	5.2	0.1	3.0	0.1	9.1	24.6	15.7

降时期. 当湿度下降时, 所有植物均受到影响, 产粉量下降, 剖面中孢粉浓度下降. 云杉属和一些喜湿的植物受到的影响更大, 完全不适应环境, 生长量急剧下降, 个别物种消失. 圆柏属的生长量也受到影响, 但圆柏属抗旱性能强, 影响小一些, 虽然绝对数减少, 但百分比因“补偿递减率”的作用反而增加.

4.3 古环境重建模式

三角城剖面孢粉组合中的主要成分反映的是山上的植被状况, 不是当地植被. 且其主要成分云杉属、圆柏属的比例关系指示流域有效湿度的变化. 云杉属丰值段: 流域内有效湿度大, 山上针叶林、针阔混交林、林下的草本灌木都得到较好的发育, 生物种类多, 长势好, 产粉量大. 由于湿度大, 主要产流区的针叶林带向下游产生的径流也强. 径流在促成尾闾区湖泊产生的同时, 将山上大量的植物花粉带到尾闾区沉积. 圆柏属丰值段: 气候变干, 山上喜湿的植物如云杉属等不适应环境, 生长范围缩小或消失. 流域内物种数、花粉总量都减少. 径流强度减弱, 湖泊萎缩. 圆柏属抗旱能力强, 虽然生长范围和花粉总数都有所减少, 但程度不及云杉属之剧.

5 全新世早期古环境重建

据云杉、圆柏属和其他有环境指示意义物种的变化, 将整个剖面的孢粉组合大致分为 10 个孢粉带(图 2). 依据上述模式, 重建该流域全新世早期环境演化过程.

10~9.8 kaBP(1 带): 孢粉组合中(下同)云杉属和圆柏属百分比相近, 水生植物开始出现. 整个流域湿度开始上升, 尾闾区已形成稳定的湖泊.

9.8~9.2 kaBP(2 带): 圆柏属占绝对优势, 干旱植物、禾本科含量均较高, 为一个波动的干燥期. 山上以圆柏林为主, 云杉林和阔叶林退化消失; 山下荒漠草原、荒漠范围扩大.

9.2~8.55 kaBP(3 带): 云杉属百分比相对较高, 且有波动, 圆柏属、干旱植物与云杉属成反相关波动. 该时段是一个在较湿润背景上的气候波动期.

8.55~8.25 kaBP(4 带): 圆柏属占绝对优势, 干旱植物百分比较高, 是一个湿度相对适中、略偏干的时期. 祁连山山上圆柏-云杉林发育, 流域下游干旱植被范围略有扩大.

8.25~7.75 kaBP(5 带): 云杉属百分比较高, 该时段是一个持续时间较长的湿润期. 山上针叶林、林下灌木、蕨类发育较好. 整个流域植被覆盖度较大, 尾闾区湖泊范围扩大.

7.75~7.25 kaBP(6 带): 圆柏属含量极高, 禾本科成为主要成分, 白刺含量达到最大值. 流域湿度小, 荒漠植被范围扩大, 该时段是全新世早期最干燥的时期.

7.25~7.0 kaBP(7 带): 云杉属含量和孢粉浓度达最高值段. 该时段为一极度湿润期. 山上云杉-松-圆柏林、阔叶树及林下植被长势均较好, 生物种类多, 尾闾区湖泊扩大.

7.0~6.8 kaBP(8 带): 圆柏属占绝对优势, 禾本科、菊科和干旱植物出现峰值, 水生植物消失. 孢粉浓度极低. 该时段为一个极干燥期. 山上云杉林几乎消失, 仅剩圆柏林; 山下荒漠范围扩大, 以旱生的草本和灌木为主.

6.8~6.45 kaBP(9 带): 云杉属占绝对优势, 孢粉浓度出现一个峰值区. 此时段为一个湿润期. 尾闾区湖泊再次扩大, 水中发育淡水绿藻, 表明湖水水质较好, 矿化度低.

6.45~6.3 kaBP(10 带): 圆柏属含量很高, 干旱植物和草本形成峰值, 孢粉浓度较低. 环境再度恶化, 祁连山山上云杉-松林退化, 分布范围减小. 山下荒漠范围扩大.

6 讨论与结论

(ⅰ) 在非小型封闭盆地研究区, 仅从孢粉组合本身出发对研究点进行古环境重建, 其结果是不可靠的, 必须考虑沉积环境、孢粉来源和孢粉组合代表的环境意义, 才可能正确地进行研究流域或研究点的古环境重建. 综合研究了上述因素后确定: 石羊河尾闾湖泊孢粉记录并不指示当地植被状况, 而指示流域山上的植被状况. 孢粉组合中的主要成分云杉属、圆柏属的比例关系指示流域有效湿度的变化. 云杉属的丰值对应有效湿度丰值, 圆柏属丰值对应有效湿度的低值.

(ⅱ) 干旱区控制生物生长量的主要生态因子是湿度, 温度次之. 湿度的变化可引起当地植被的强烈变化. 湿度增加, 流域的植被状况得到改善, 整个流域生物种类多, 生长量大, 地表植被覆盖度大. 湿度降低, 山上、山下喜湿物种消失, 整个流域植被覆盖度大幅度下降. 温度变化主要引起植被带的上、下移动, 不会引起整个流域植被组成的大幅度变化. 三角

城剖面孢粉组合的变化反映出了这个特征. 云杉属丰值段湿度增加, 孢粉浓度、生物种类增加, 圆柏属丰值段, 气候干旱, 孢粉浓度急降, 生物种类剧减.

(ⅲ) 石羊河流域全新世早期气候变化具很强的波动性, 每个湿润期和干燥期中都有多个次一级的干湿波动, 甚至出现持续不到百年的快速、大幅度的波动, 其变化的总体趋势和突发事件都与全球其他地区的气候变化具有较好的可比性, 这说明上述环境重建模式是正确的. 石羊河流域全新世早期环境变化的总体趋势与据黄土沉积特征、冰川进退、湖泊演化需综合研究成果确定的西北地区近万年来环境变化的趋势[21]吻合得较好. 已有的研究发现, 格陵兰冰芯中的粉尘源区主要位于中国干旱地区[22], 格陵兰冰芯记录到的大陆粉尘事件应主要指示我国干旱、半干旱地区的干旱事件. 格陵兰冰芯记录的 5 次主要大陆粉尘事件[23]的第 4 次、第 5 次事件与本项研究的时段相同, 这两次粉尘事件三角城剖面孢粉记录均有反应, 它们对应第 2 和第 6 孢粉带的两个干旱期. 作为高分辨率的孢粉记录, 三角城剖面孢粉记录揭示了一些持续时间很短的突发事件. 第 8 孢粉带(日历年 8.1~7.9 kaBP, 考虑其他地点的年龄是日历年, 此处用日历年)反映出, 早全新世存在一次世纪尺度高强度的冷干事件. 这次冷干事件并不是孤立的. 北半球各大洲近 10 个地点约 8.4~8 kaBP 存在一次强降温的冷干事件[24]; GISP2 和 GRIP 冰芯的δ^{18}O 和甲烷浓度曲线显示 8.2 kaBP 的强降温事件是全新世降温幅度最大的一次[25~27]; ROI 记录显示 8.2 kaBP 西格陵兰 Naujg 1 湖泊存在迄今为止全新世最冷的降温事件[28]; 用孢粉-气候转换函数对西藏东南部高分辨率孢粉记录的计算显示 7.9 kaBP 当地年均温、年均降雨量存在一次突然的大幅度下降[29]. 这次事件各地记录时间有 0.1~0.2 ka 的差异, 这主要与研究的分辨率、测年的方法、材料和年龄外推的方法有关.

致谢 孢粉鉴定和孢粉记录的环境解释得到了孙湘君, 唐领余, 孔昭宸, J. Dodson, 王伟铭, 于革等教授的帮助和指点, 作者深表感谢. 本工作受国家自然科学基金重点项目(批准号: 49731010)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043501)资助.

参 考 文 献

1 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998. 1~580
2 Bonny A P. The effect of pollen recruitment processes on pollen distribution over the sediment surface of a small lake in Cumbria. J Ecol, 1978, 66: 385~416
3 Tutin T G. The origin of pollen in lake sediments: An enclosed lake compared with one receiving inflow streams. New Phytol, 1979, 83: 189~213
4 George H, Debusk Jr. The distribution of pollen in the surface sediments of lake Malawi, Africa, and the transport of pollen in large lakes. Rev Palaeobot Palynol, 1997, 97: 123~153
5 Horowitz A. Palynology of Arid Lands. Amsterdam: Elseriver Science Publishers, 1992. 1~530
6 Chen F H, Shi Q, Wang J M. Environmental change documented by sedimentation of lake Yiema in arid China since the last glacial. J Paleolimnol, 1999, 22(2): 159~169
7 张虎才, 马玉贞, 李吉均, 等. 腾格里沙漠南缘全新世古气候变化初步研究. 科学通报, 1998, 43(12): 1252~1258
8 Pachur H J, Wunnman B, Zhang H C, et al. Lake evolution in the Tengger Desert, Northwest China, during the last 40000 years. Quat Res, 1995, 44: 171~180
9 黄大燊. 甘肃植被. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1997. 163~176
10 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 195~197
11 陈发虎, 朱艳, 李吉均, 等. 民勤盆地湖泊沉积记录的全新世千百年尺度季风变化. 科学通报, 2001, 46:
12 Janssen C R. Recent pollen spectra from the deciduous and conniferous-deciduous forests of Northeasten Minnesota: A study in pollen dispersal. Ecol, 1966, 47(5): 804~824
13 李文漪. 中国第四纪植被与环境. 北京: 科学出版社, 1998. 8~16
14 孙湘君, 王琦瑜, 宋长青. 中国北方部分科属花粉-气候响应面分析. 中国科学, 1996, 26(5): 431~436
15 Faegri K, Iversen J. Textbook of Pollen Analysis. 4th ed. London: John Wiley & Sons Press, 1988. 27~36
16 Brush G S, Brush L M. Transport of pollen in a sediment-laden channel: A laboratory study. American Journal of American Science, 1972, 272: 1359~1381
17 Fall P L. Pollen taphonomy in a Canyon stream. Quat Res, 1987, 28: 393~406
18 Xu Q H, Yang X L, Wu Z, et al. Alluvial pollen on the North China Plain. Quat Res, 1996, 46: 270~280
19 Stangster A G, Dale H M. A preliminary study of differential pollen grain preservation. Can J Bot, 1961, 39: 35~43
20 Traverse A, Gingsburg R N. Palynology of the surface sediments of Great Bahama Bank as related to water movement and sedimentation. Mar Geol, 1966, 4: 417~459
21 徐国昌. 中国干旱半干旱区气候变化. 北京: 气象出版社, 1997. 19~29
22 Biscaye P E, Grousset F E, Revel M, et al. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Core Project 2 ice core, summit, Greenland. J Geophy Res, 1998, 102(C12): 26765~26781
23 O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. Science, 1995, 270: 1962~1964
24 Alley B R, Mayewski A P, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. Geology, 1997, 25(6): 483~486

25 Grootes P M, Stuiver M, White J W C, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. Nature, 1993, 366: 552~554

26 Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes. Quat Res, 1995, 44: 254~341

27 Blunier T, Chappellaz J, Schwander J, et al. Variations in atmospheric methane concentration during the Holocene epoch. Nature, 1995, 374: 47~50

28 Willemse W N, Törnqvist E T. Holocene century-scale temperature variability from west Greenland lake records. Geol, 1999, 27: 580~584

29 唐领余, 沈才明, 廖淦标, 等. 西藏两个小湖高分辨率的花粉记录. 植物学报, 1999, 41(8): 896~902

(2001-04-25 收稿, 2001-07-11 收修改稿)