新疆北部平原湖泊记录的晚全新世湖面波动及环境变化

冯晓华[①] 阎 顺[①] 倪 健[②] 孔昭宸[②] 杨振京[③]

(①中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ②中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093;
③中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 正定 050308. E-mail: Fengxh@0020@sina.com)

摘要 新疆地处北半球西风带干旱区, 有关其过去气候冷暖干湿组合的争论较多, 而新疆北部平原湖泊多为封闭湖和尾闾湖, 对气候的反映灵敏度非常高. 以孢粉数据为主, 同时结合磁化率、烧失量、粒度、沉积相等辅助资料, 对新疆北部平原四厂湖、东道海子湖和艾比湖所反映的湖面波动及环境变化进行了综合分析, 揭示了晚全新世新疆北部平原以冷湿和暖干为主的温度与湿度组合模式, 同时进行了影响因素的初步讨论.

关键词 新疆北部 平原湖泊 晚全新世 湖面波动 环境变化

湖泊具有较好的连续性以及剖面保存的完整性, 故而常常成为揭示湖区古气候和环境变化的示踪器. 多年来中国的第四纪地质学家在不同地区进行了大量的湖泊钻孔/剖面研究, 积累和发表了沉积、古生物、地球化学等多方面成果, 提供了古湖泊水量变化的气候信息[1]. 于革等[1]在中国古湖泊数据库基础上对中国东、西部湖泊水量的演化过程及分异特点作了初步的比较. 新疆位于欧亚大陆中心, 是中国最干旱的地区, 有其独特的研究价值. 目前对新疆湖泊的研究已较多[2~16], 但大多局限在对单个湖泊水量变化的研究上, 对区域湖泊的集成研究还很薄弱. 全新世气候变化一直以来也是全球变化研究的热点之一, 许多地方对全新世气候的不稳定性[17~23]都有报道, 本文以东道海子湖、艾比湖、四厂湖的孢粉等数据资料为基础, 对新疆北部平原晚全新世湖面波动及环境变化进行综合对比分析研究, 并对影响因素进行初步剖析, 这不仅有助于新疆环境演变的研究, 也有益于干旱区全球变化研究等.

1 湖区自然概况及研究方法

新疆北部平原湖泊多为河流尾闾湖. 这些湖泊受环境变化的影响很大, 面积和水位均不稳定, 湖区的自然状况也各有特点. 四厂湖位于古尔班通古特沙漠东南缘吉木萨尔县城北 30 多公里处, 所取剖面地理坐标为 89°8.6′E, 44°18.6′N, 海拔 589 m, 剖面总厚 1.0 m, 共分 6 层. 该湖的南部现在是盐化草甸, 其北部已被沙丘覆盖. 东道海子湖是乌鲁木齐河下游的尾闾湖, 位于乌鲁木齐市以北 90 km. 所取的东道海子湖的剖面位于湖的北端(89°33.5′E, 44°41.7′N), 海拔 430 m, 剖面总厚 1.90 m, 共分 12 层. 这里属典型的温带大陆性气候, 气候温暖、干旱少雨, 年均气温 5~7℃, 年均降水量约 150 mm. 自然植被为荒漠, 主要是梭梭荒漠, 伴生少量短命植物和一年生植物. 艾比湖位于准噶尔盆地西南, 是北疆一典型的干旱区封闭型湖泊, 湖区年均降水为 95 mm, 年蒸发力达 1315 mm. 剖面位于湖南岸, 地理坐标为 82°44.1′E, 44°52.2′N, 海拔 195 m, 剖面深度为 1.80 m, 共分 9 层. 湖滨盐土上为多汁盐柴类荒漠, 由盐节木、盐角草、盐穗木等组成, 也发育较大面积的刚毛柽柳灌丛.

对 3 个湖泊都采用常规的方法进行样品采集和分析. 剖面中 ^{14}C 年龄样品由中国地震局地质研究所实验室测定, 液闪仪型号 Quantulus-1220(LKB), ^{14}C 测年数据均经过树轮校正. 在四厂湖剖面自下而上采集 20 个孢粉样品, 在剖面上第 3 层和第 5 层采集了两个 ^{14}C 样. 在四厂湖以东 30 多公里的满营湖古沼泽沉积中采样一个(有 ^{14}C 测年), 共鉴定出 35 个科属的孢子花粉. 东道海子剖面自下而上分为 12 个沉积层, 孢粉样品 64 个, 并对花粉浓度做了测定. 经分析发现较丰富的孢子花粉, 共鉴定出 36 个科属的孢子花粉. 对东道海子剖面采集的 64 个样品还分别进行了粒度、磁化率和烧失量分析. 粒度分析采用 Mastersizer2000 型激光粒度仪测定样品、磁化率采用 MS2 型磁化率仪测定样品. 艾比湖剖面自上而下分为 9 层, 共取孢粉样 11 个, 除 10 和 11 号样品仅见个

别花粉外，其余样品基本达到统计要求，分析后发现22科31个属种花粉.

2 湖泊沉积记录

2.1 四厂湖孢粉分析结果(图1)

剖面100~82 cm以下为Ⅰ组合. 该组合特点是以藜科几个属种含量最高，其次为柽柳属和蒿属，其他成分含量少，外来的云杉属花粉不足4%.

剖面82~30 cm为Ⅱ组合. 该组合有20个以上科属植物花粉. 香蒲、莎草科、禾本科、百合科平均约20%；麻黄属平均约15%；蒿属和菊科平均约11%；柽柳属、琵琶柴属、白刺属、盐豆木属一般均10%以下；云杉属和桦属总数一般在5%以下；藜科几个属种的花粉在剖面中是最低的，稳定在30%~40%.

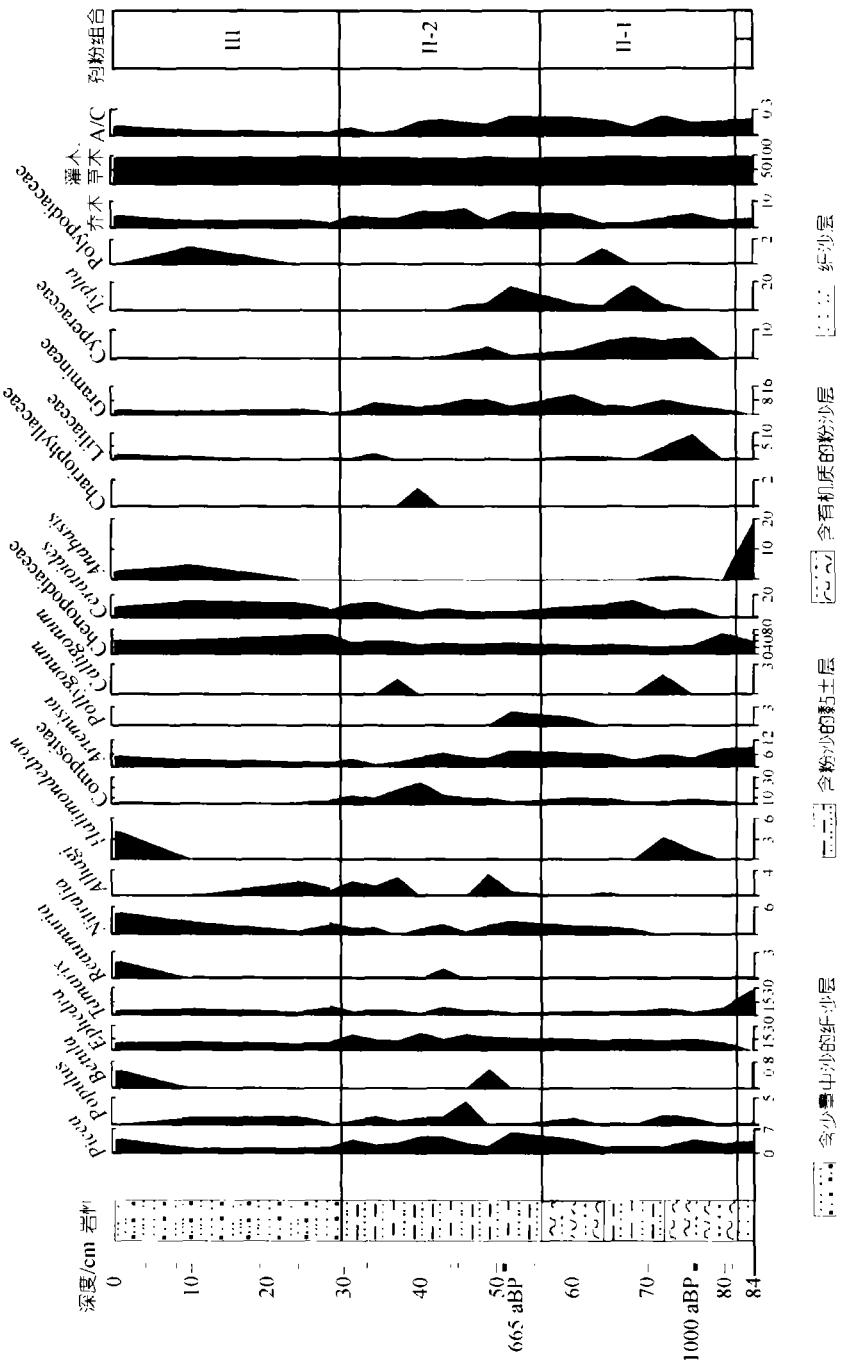


图1 四厂湖剖面孢粉、A/C比值综合图谱

剖面 30~0 cm 为Ⅲ组合. 该组合花粉以旱生、超旱生植物占绝对优势. 藜科几个属种的花粉平均约 55%; 麻黄属平均约 13.9%; 蒿属和菊科花粉平均约 11.25%; 柽柳属、琵琶柴属、白刺属、盐豆木属一般均 10%以下; 香蒲、莎草科、禾本科、百合科总量一般不足 5%; 云杉属和桦属花粉总数一般 3%以下.

另外, 在满营湖古沼泽沉积中采集的样品中, 其孢粉组合主要成分有藜科、香蒲属、禾本科、蒿属、莎草科等. 其中莎草科(主要是苔草)占 15.3%、香蒲属占 24.1%、禾本科占 15.8%、藜科各属为 19.1%、蒿属和菊科占 8.4%, 其他在 5%以下. 反映当时沼泽地水生植物生长较好. 该沉积物的 ^{14}C 测年为(1130 ± 60) aBP, 树轮校正为(1160 ± 65) aBP.

2.2 东道海子湖(图 2)

(1) 孢粉分析结果. 剖面 190~132 cm 以下为Ⅰ组合(4500~3530 aBP). 该组合以藜科几个属种含量最高; 其次为蒿属、柽柳属和麻黄属; 还有少量琵琶柴属、菊科、禾本科等成分; 外来的云杉属花粉平均 1.4%; A/C 仅 0.32.

剖面 132~87 cm 为Ⅱ组合(3530~3120 aBP). 该组合藜科几个属种的花粉比Ⅰ组合减少; 柽柳属和麻黄属也有所降低; 琵琶柴属、白刺属、霸王属一般在 5%以下; 禾本科、香蒲属和莎草科花粉比Ⅰ组合明显增加; 外来花粉云杉属和桦属均少量出现, 平均 6%; A/C 为 0.26.

剖面 87~0 cm 为Ⅲ组合(3120aBP~). Ⅲ组合中花粉平均值分别为藜科 34.3%, 蒿属 14.0%, 柽柳属 8.5%, 麻黄属 10.8%, 琵琶柴属 3.4%. 另一方面中生和水生植物花粉(禾本科、莎草科、香蒲属)有明显增加, 花粉浓度也明显增长. Ⅲ-1 组合(3120~2410 aBP) A/C 比值为 1. 另外禾本科和香蒲属含量较高, 分别达到 7.0%和 7.5%, 在该段样品中还发现大量的硅藻化石. Ⅲ-2 组合(2410~1700 aBP)A/C 比值为 0.4. 藜科平百分含量为 33.3%,蒿属为 9.4%, 还有柽柳属 7.8%、麻黄属 11.5%、琵琶柴属 4.4%、白刺属 1.7%、霸王属 1.1%、菊科 1.9%、禾本科 9.1%、香蒲属 5.9%等花粉. Ⅲ-3 组合(1700~1310 aBP)、Ⅲ-5 组合(1270~305 aBP)与Ⅲ-1 组合有一定的相似性, A/C 比值分别为 0.7 和 0.8, 都发现大量的硅藻. Ⅲ-4 组合(1310~1270 aBP)、Ⅲ-6 组合(305aBP~)与Ⅲ-2 组合有一定的相似性, A/C 比值为 0.4 和 0.5, 样品中硅藻均不多.

(2) 磁化率、烧失量和粒度分析结果. 根据高频磁化率和低频磁化率测试得到的磁化率特征变化曲线反映: 对应于孢粉Ⅰ组合带, 高频磁化率和低频磁化率为相对高值区; 对应于Ⅱ组合带, 磁化率也为相对高值区; 对应于Ⅲ组合带, 磁化率发生明显波动. 对应于孢粉Ⅲ-1, Ⅲ-3 和Ⅲ-5 组合亚带, 磁化率为相对低值区, 对应于Ⅲ-2, Ⅲ-4 和Ⅲ-6 组合亚带, 磁化率为相对高值区. 烧失量特征变化曲线反映, 剖面上烧失量有明显变化. 对应于孢粉Ⅰ和Ⅱ组合带, 烧失量在 5%左右, 只在剖面第 11 层稳定在 10%左右; 对应于Ⅲ组合带, 烧失量明显上升, 最高达到 34%. 粒度变化曲线反映了剖面上的粒度特征. 对应孢粉Ⅰ组合, 中值粒径为相对高值, 平均 80.6 μm ; 对应Ⅱ组合, 中值粒径也为相对高值, 平均 83.9 μm; 对应Ⅲ组合, 中值粒径明显下降, 平均 45.9 μm.

2.3 艾比湖(图 3)

(1) 孢粉分析结果. 剖面 180~164 cm 以下(2500~2250 aBP)样品花粉含量极少, 其中 11 号样中发现大量黑色炭片. 剖面 164~160 cm(2250~1650 aBP)的 9 号样花粉含量少, 其中耐盐的灌木占 85%左右, 梭梭属、柽柳属和沙拐枣属分别为 31.8%, 21.2%和 13.6%. 剖面 160~28 cm (1650~500 aBP)的 4~8 号样品中, 灌木、半灌木花粉平均 72.9%. 藜科各属平均 28%, 其中梭梭属平均 9.0%; 盐节木属平均 17.3%. 柽柳属平均 26%. 草本植物平均 22.2%, 其中蒿属平均 17.1%, 其他有禾本科、菊科、伞形科、十字花科、香蒲属等. 外来的云杉属花粉 0.7%~7.2%, 平均 4.3%. 该组合反映环境相对偏湿润, 植物种类偏多, A/C 比值也是整个剖面中最高的.

剖面 28~7 cm(500~300 aBP), 2~3 号样品中灌木花粉占 67.8%~77.5%, 平均 72.7%. 其中极耐盐的盐节木属占 30.7%~45.1%, 平均 37.9%, 柽柳属平均 6.6%, 沙拐枣属平均 8.3%, 麻黄属平均 6.6%, 梭梭属仅占 43%. 草本花粉中蒿属占 9.7%~9.6%, 平均 14.7%, 亦有少量禾本科、菊科、紫菀属、车前属等花粉. 反映植被又趋于荒漠化. 剖面 7~0 cm(300aBP~), 样品中灌木成分高达 88.5%, 其中柽柳属 37.4%, 梭梭属 21.5%, 琵琶柴属占 14%, 沙拐枣属 6.5%.

(2) 沉积相. 艾比湖剖面具有明显的由细粒沉积物构成的水平纹理, 根据各层不同的沉积物及沉积韵律推测, 相对而言, 第 1 层属浅湖沉积; 第 2 层为湖沉积; 第 3 层为湖沼沉积, 沉积中有机物多; 第 4

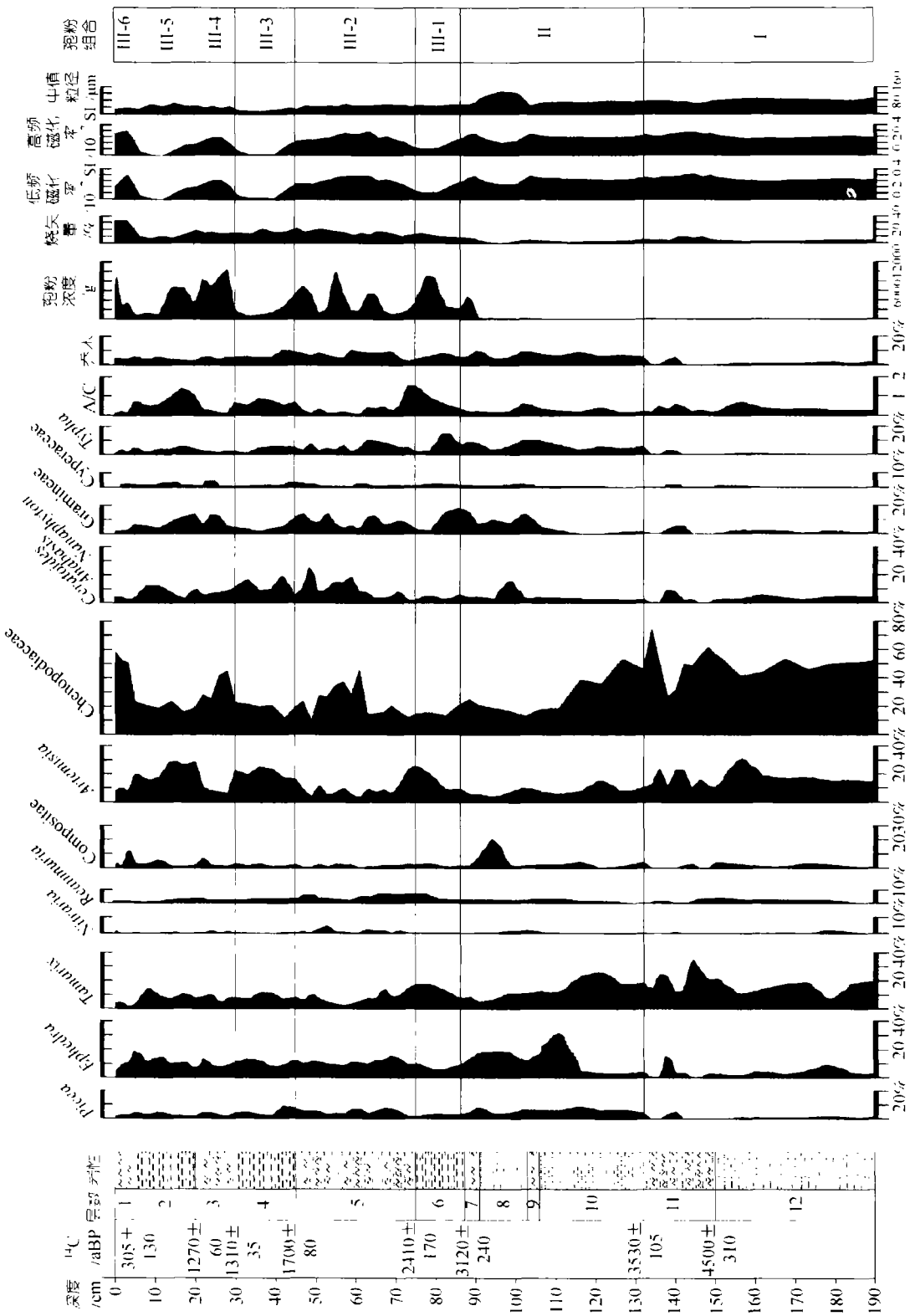


图2 东道海子湖剖面孢粉、磁化率、烧失量、粒度、A/C值综合图谱

层为湖沉积，沉积物具明显的细水平纹理结构；第5层为浅湖沉积；第6层为冲积扇缘沉积；第7~9层为湖沉积. 该剖面的沉积层基本均为湖相沉积，但沉积中很少水生植物，香蒲属的花粉出现也少，这与博斯

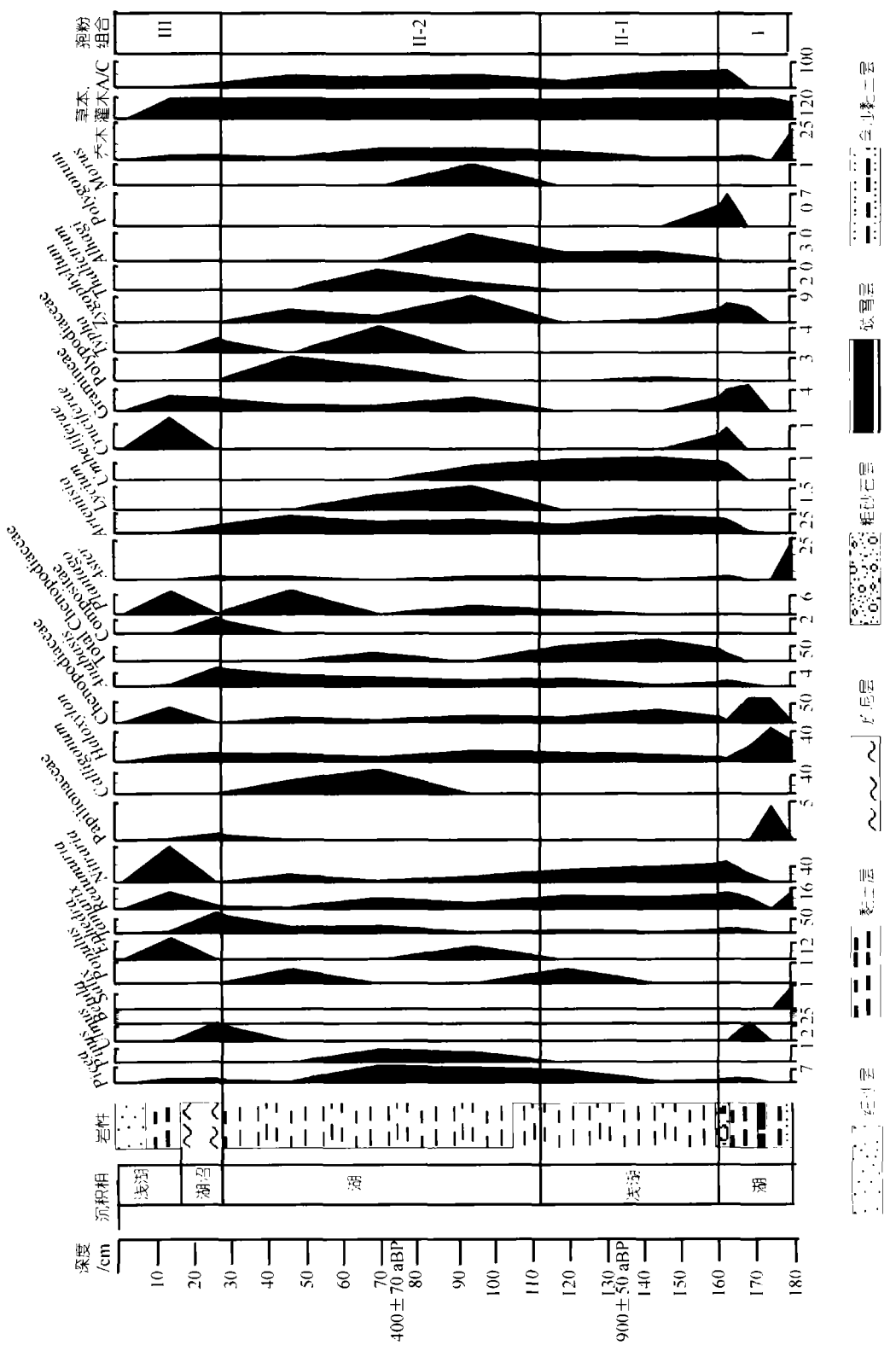


图 3　艾比湖剖面沉积相、孢粉、A/C 比值综合图谱

腾湖等湖泊沉积有一定差别，可能与湖泊的盐度有关. 艾比湖盐度高，导致花粉的缺乏. 剖面中柽柳大量而稳定地出现也从另一个侧面反映出该湖处于盐度较高的状态，只在艾比湖的高水位时期则出现部

分香蒲花粉.

3 结论与讨论

3个湖泊的沉积记录可以从孢粉、磁化率、烧失量、粒度、沉积相等多方面反映新疆北部平原地区晚全新世湖面波动及环境变化的一般规律: 4500~3500 aBP, 东道海子湖周为旱生植物占绝对优势的荒漠植被, 建群植物主要是藜科的属种, 有梭梭、驼绒藜、假木贼、小蓬等, 沼泽沉积发育, 反映湖面处于较低水位; 磁化率和中值粒径为相对高值; 烧失量相对较低, 均反映暖干气候. 3500~3120 aBP, 该区域仍为以超旱生灌木和草本植物占优势的荒漠植被, 藜科的多个属种和柽柳属、麻黄属、蒿属、琵琶柴属等为主要植物, 湖面再次降低; 磁化率、粒度和烧失量均未出现大的变化; 同时期大西沟剖面云杉林上移[24], 气候仍相对暖干. 3120~2410 aBP, 东道海子湖外围为荒漠草原, 湖里有大量硅藻生长, 反映当时湖泊稳定、水质较好且湖面相对升高, 磁化率、烧失量和粒度也均为低值, 可以对应乌鲁木齐河源、贡嘎山海螺沟等地[25,26]的冰川冰进事件. 大西沟剖面也反映当时属于寒冷时期, 表明该区域应该属于相对冷湿气候. 2410~1700 aBP, 柽柳、麻黄、琵琶柴等干旱性指示植物都有相对增长, 香蒲等水生植物则相对减少, 表明东道海子湖区又转为荒漠植被, 沼泽沉积发育, 湖面再次下降, 磁化率等也均有相对升高. 该时段内艾比湖沉积相基本属于浅湖面期, 按现代湖面积和湖岸线, 当时湖水面积应不足 600 km^2, 花粉含量较少, 耐盐灌木所占比例极大, 梭梭、柽柳等耐旱耐盐植被也较多, 表明当时艾比湖区为以灌木植被为主的荒漠. 大西沟剖面也反映气候为由冷向暖过渡, 竺可桢[27]也认为战国时代, 中国气候属于相对温暖期, 年均气温高于现代 1~2℃, 表明当时该区气候又转为相对暖干. 1700~1310 aBP, 东道海子湖周反映为荒漠草原, 湖里又发现大量的硅藻, 湖面再次上升, 磁化率等值均有所回落. 艾比湖沉积相属于最高湖面期(1700~600 aBP, 当时的湖面海拔在 226~210 m 之间, 高出现代湖面 15~31 m[10]), 孢粉含量也很丰富, 其中大部分为灌木、半灌木, 禾本科、菊科等中生水生植物较多, 反映为以灌木为主的荒漠草原植被. 同时期桦树窝子剖面[28]显示云杉林带下移 250 m 左右, 气候相对冷湿. 这一时期南疆地区气候也显示为相对凉湿, 是新疆普遍存在的一成碳期[29]. 1310~1270 aBP, 东道海子湖反映为荒漠植被并且硅藻化石含量减少, 湖面再次下降, 磁化率等均为高值; 四厂湖剖面反映为风成沉积和荒漠植被, 建群植物主要是藜科的属种, 植被的覆盖度较低, 这些都明确地指示了当时较为暖干的气候背景. 1270~305 aBP, 东道海子湖的植被又反映出荒漠草原特征, 湖面再次上升, A/C 比值为 0.8, 磁化率等再次降低; 艾比湖植被也反映为荒漠草原, 湖面也处于较高水位时期; 四厂湖反映为浅湖和沼泽植被, 湖水位相对有所升高, 水生和沼生的香蒲、苔草、芦苇等分布较广, 植被覆盖度较高; 大西沟剖面也反映出较为湿润的气候. 300 aBP~, 东道海子湖反映当时湖泊外围为荒漠, 接近现代植被, 湖面逐渐下降, 而烧失量更是达到最高值; 艾比湖剖面耐盐的盐节木属大量出现, 柽柳、麻黄、沙拐枣等也较多, 主要为荒漠植被; 四厂湖反映为低地草甸到荒漠植被的过渡, 藜科属种为该时段的建群植物, 整个区域植被覆盖度较低. 这一时期整个北疆平原湖泊已受到人类活动的强烈干扰, 但仍能一定程度地代表该地继续干旱的气候大趋势.

由于取样点的疏密程度不同、测年误差或局地小气候影响等多种原因, 各湖沉积所记录的气候环境变化时间并不完全一致, 但仍能体现下列一般规律: 植被以荒漠草原为主的时期, 湖面较高, 气候趋于冷湿; 植被以荒漠为主的时期, 湖面较低, 气候趋于暖干. 这可在新疆北部现代植被的分布格局上有所体现: 荒漠在平原中部; 而荒漠草原出现在山麓与平原交界地带, 海拔高出邻近荒漠 200 m, 年均降水量大于邻近荒漠区约 50~100 mm, 而年均气温低约 1~2℃. 这些都体现了在以干旱为大背景的前提下, 新疆北部平原晚全新世气候变化以暖干和冷湿交替为主的特征. 李树峰等[30]在利用硅藻对东道海子剖面进行分析时也体现出这一点. 吴敬禄[31]最近在利用同位素记录对艾比湖近 1500 aBP 来气候环境演化特征的研究中也非常清晰地得出了类似的结论. 这种温暖期相对干旱而寒冷期相对湿润的现象, 在天山地区的第四纪时期曾多次出现过, 尤其是晚冰期和冰期后有明确表现[32]; 姚檀栋等[33]根据对乌鲁木齐河小冰期以来各种资料的分析也得出, 该区气候年变化有暖干、冷湿、冷干、暖湿等多种类型, 但以暖干和冷湿为主. 钟巍等[34]在对南疆尼雅剖面进行研究时也认为该地区近 4000 aBP 来气候环境的演化出现以相对凉湿和相对暖干交替的特征. 这几乎成为新疆晚全新世环境变化的主要规律. 影响新疆降水的气

候因素是复杂的，受来自大西洋和北冰洋的西风气流影响较大. 方小敏等[35]的研究认为，在长期变化和冰期-间冰期旋回演化上西风环流越强，降水越大. 张小曳[36]的研究也已经指出了新冰期西风环流加强并南移的事实. 由此可见，新疆北部平原晚全新世气候变化出现百年尺度上暖干冷湿特殊组合可能与新冰期西风带南移的大气环流格局有关.

致谢 兰州大学朱艳博士协助测试样品，尹金辉先生等进行年龄测定，在本文的修改过程中穆桂金研究员提出了宝贵的意见和建议，在此一并致谢. 本工作为国家自然科学基金重点项目(批准号: NSFC90102000)、中国科学院创新重大基金项目(KZCX1-10-05)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043502)资助.

参 考 文 献

1 于革，薛滨，刘健，等编著. 中国湖泊演变与古气候动力学研究. 北京: 气象出版社, 2001
2 李秉孝，蔡碧琴，梁青生. 吐鲁番盆地艾丁湖沉积特征. 科学通报, 1988, 33(8): 608—610
3 王静泰，焦克勤. 柴窝堡-达坂城地区地貌、第四纪沉积及湖面变化. 见: 施雅风，曲耀光，主编. 柴窝堡-达坂城地区水资源环境. 北京: 科学出版社, 1989. 11—22
4 韩淑媞，袁玉江. 新疆巴里坤湖35000年来古气候变化序列. 地理学报, 1990, 45(3): 350—362
5 阎顺，李文漪，梁玉莲，等. 新疆柴窝堡盆地更新世孢粉组合与环境. 见: 干旱区地理集刊. 北京: 科学出版社, 1991. 1—15
6 钟巍. 近 500 年来新疆巴里坤湖相沉积物的生物地层学古气候意义. 新疆大学学报(自然科学版), 1993, 10(2): 154—160
7 孙湘君，林瑞芬. 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, 1994, (3): 239—248
8 吴敬禄. 新疆艾比湖全新世沉积特征及古环境演化. 地理科学, 1995, 15(1): 39—46
9 顾兆炎，赵惠敏，王振海. 末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录. 第四纪研究, 1998,(4): 328—334
10 柏春广，穆桂金. 艾比湖的湖岸地貌及其反映的湖面变化. 干旱区地理, 1999, 22(1): 34—40
11 阎顺，孔昭宸，杨振京. 新疆吉木萨尔县四厂湖剖面孢粉分析及其意义. 西北植物学报, 2003, 23(4): 531—536
12 阎顺，孔昭宸，杨振京，等. 2500 年来艾比湖的环境演变信息. 干旱区地理, 2003,26(3): 225—231
13 阎顺，李树峰，孔昭宸，等. 乌鲁木齐东道海子剖面的孢粉分析及其反映的环境变化. 第四纪研究, 2004, 24(4): 463—468
14 阎顺，穆桂金，孔昭宸，等. 天山北麓晚全新世环境演变及其人类活动的影响. 冰川冻土, 2004, 26(4): 403—410
15 吴敬禄，林琳. 新疆艾比湖湖面波动特征及其原因. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 57—6
16 李志忠，海鹰，周勇，等. 乌鲁木齐河下游地区 30 kaBP 以来湖泊沉积的孢粉组合与古植被古气候. 干旱区地理, 2001, 24(3): 201—205
17 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. Science, 1997, 278: 1257—1266
18 Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in north Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. Nature, 1999, 397: 515—517
19 Enzel Y, Ely L L, Mishra S. High-resolution holocene environmental changes in the thar desert, northwestern India. Science, 1999, 284: 125—128
20 Luckge A, Doose-Rolinski H, Khan A A, et al. Monsoonal variability in the northeastern Arabian Sea during the past 5000 years: geochemical evidence from laminated sediment. Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology, 2001, 167: 273—286
21 McDermott F, Materry D P, Hawkesworth C. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}O$ record from SW Ireland. Science, 2001, 294: 1328—1331
22 Wurster C M, Patterson W P. Late Holocene climate change for the eastern interior United States: evidence from high-resolution $\delta^{18}O$ value of marital otoliths. Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology, 2001, 170: 81—100
23 Baker P A, Seltzer G O, Fritz S C. et al. The history of South American tropical precipitation for the past 25000 years. Science, 2001, 29(1): 640—643
24 Zhang Y, Kong Z C, Yang Z J, et al. Vegetation Changes and Environmental Evolution in the Urumqi River Head, Central Tianshan Mountains Since 3.6 kaBP: a Case Study of Daxigou Profile. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 655—667
25 施雅风主编. 中国冰川与环境. 北京: 科学出版社, 2000. 361—362
26 Zheng Benxing. Glacier variation in the monsoon maritime glacial region since the last Glaciation on the Qinghai Xizang (Tibetan)Plateau[A]. Jablonski N G. The Changing Face of Eastern Asia during the Tertiary and Quaternary. Hongkong: Center of Asia Studies, Univ of Hongkong, 1997. 103—114
27 竺可桢. 中国近 5000 年来气候变迁的初步研究. 见: 竺可桢文集. 北京: 科学出版社, 1979. 475—497
28 阎顺，孔昭宸，杨振京，等. 东天山北麓 2000 多年以来的森林线与环境变化. 地理科学, 2003, 23(6): 699—704
29 钟巍，熊黑钢，舒强. 全新世以来南疆地区气候环境演变与人类活动的关系. 地理科学进展, 2000, 19(4): 307—316
30 李树峰，阎顺，孔昭宸，等. 乌鲁木齐东道海子剖面的硅藻记录与环境演变. 干旱区地理, 2005, 28(1): 81—87
31 吴敬禄. 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征. 第四纪研究, 2004, 24(5): 585—589
32 李文漪著. 中国第四纪植被与环境. 北京: 科学出版社, 1998
33 姚檀栋，施雅风. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势. 中国科学, B 辑, 1988, 6: 657—666
34 钟巍，熊黑钢，王立国，等. 塔里木盆地南缘策勒绿洲近 4000 年来的环境变化. 地理科学, 2004, 24(6): 687—692
35 方小敏，吕连清. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升. 中国科学, D 辑, 2001, 31(3): 177—184
36 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积. 第四纪研究, 2001, 21(1): 29—40

(2005-07-20 收稿, 2006-01-16 收修改稿)