

新疆草滩湖村湿地 4550 年以来的孢粉记录和环境演变

张芸, 孔昭宸, 倪健, 阎顺, 杨振京

中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室, 北京 100093;

中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 正定 050803

E-mail: zhangygl@ibcas.ac.cn

2007-09-03 收稿, 2007-11-15 接受

国家自然科学基金面上项目(批准号: 40601104)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 90102009)和教育部留学回国人员科研启动基金资助

摘要 通过对新疆石河子市草滩湖村湿地剖面进行的年代测定、孢粉、植硅体鉴定和炭屑统计, 以及磁化率、烧失量和粒度等多项环境指标的综合分析指出在 4550~2500 cal. a BP 期间, 该区气候较为干燥, 不利于泥炭堆积, 而嗣后气候变得湿润, 石河子湿地发育、淡水水生植物丰富, 有助于泥炭累积, 但其间也出现了明显的干湿变化。尤其在 2500~1810 cal. a BP 期间(550 BC~140 AD), 气候较今湿润, 湿地中曾有大量的芦苇、香蒲和黑三棱等挺水植物和淡水绿藻生长, 形成芦苇湿地景观, 而在周边区域上生长的是藜科、蒿属、菊科和唐松草属等为主要组成的荒漠草原植被; 然而, 在 1810~1160 cal. a BP 期间(140~790 AD), 沼泽湿地水体变浅, 尽管其他水生植物种类含量大幅度减少, 但仍有芦苇生长, 周围区域则是以藜科和蒿属为主的荒漠植被景观; 在 1160~650 cal. a BP 期间(790~1300 AD), 该区中旱生草本植物旺盛, 种类丰富, 并进入水生植物繁盛的荒漠草原时期; 值得注意的是, 由桦木属和云杉属组成的乔木植物花粉含量显著增高到 27.2%, 其中桦木属增至 23.2%, 从而推测此时的桦木有可能生长在沼泽湿地的高岗地; 或者可能是云杉林线下移, 导致由洪流或者是经风带来的云杉属和桦木属花粉含量均增高; 但 650 cal. a BP 以来(1300 AD 至今), 此时湿地周边地区仍是以藜科和蒿属为优势的荒漠景观, 类似于现代气候类型, 尽管仍有一些沼生水生植被生长, 但其含量已大幅度减少。

关键词

新疆草滩湖村湿地

孢粉

植硅体

4550 cal. a BP

环境演变

湿地是地球生态系统的重要组成部分, 它在维护区域生态平衡、减缓气候变化的影响和保护人类生存环境等诸多方面具有重要的生态作用^[1]。湿地的“沧海桑田”之变是自然规律, 但人类与自然共同作用, 会加速这种变化。近 2000 a BP, 特别是过去几十年来湿地的过度开发与利用, 使得湿地生态系统的结构、功能和分布发生了显著变化, 而这种变化又必然会对区域、甚至在更大范围的气候系统造成一定的影响。因此, 揭示湿地的自然演变过程和恢复古环境, 已成为国内外学者共同关注的焦点之一^[2]。

处于亚洲高地“干极”的新疆, 生态与环境组分相对单一, 对气候变化的反映甚为敏感, 其分布的湿

地则又因赋存着区域环境水文变迁和气候变化的重要信息, 从而成为研究古环境演变的有利场所。尽管新疆现有湿地总面积约为 $1.48 \times 10^4 \text{ km}^2$, 仅占全疆总面积的 0.89%^[3], 然而这些湿地生态系统却孕育出西北地区的历史文明和繁荣。近 2000 a BP, 特别是近几十年由于人口增多, 垦区不断扩大, 许多绿洲和由河流、沼泽和湖泊组成的湿地已被开垦为耕地, 干旱地区的生态环境建设与经济建设的用水矛盾变得日渐突出^[4], 使其许多湿地逐渐退化乃至消亡^[5]。据调查, 新疆湿地面积已由 20 世纪 60 年代初的 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 降至目前的 $1.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[3]。作为中国西部的主要部分, 新疆在西部大开发和西部环境保护中又占

有特殊和重要的地位与作用,因此当对湿地的开发和进行区域性环境治理时,甚有必要加强湿地长期演变过程的研究。

近年来,通过对新疆地区湿地的古气候、古环境的研究,已取得有关水资源、生态环境和可持续发展等方面的重要研究资料^[4~7],如玛纳斯湖^[8]、艾比湖^[9,10]、巴里坤湖^[11]、博斯腾湖^[12,13]和罗布泊^[14]等一些新疆重要的湿地已经积累了丰富的研究结果。分析这些研究成果,发现还有许多问题值得深入探讨:时间分辨率有待提高,在依据孢粉资料恢复湿地及周边植被过程中,还需加强对孢粉来源和传播过程机制的探讨。

因此,为揭示新疆湿地环境演变的特征、过程和形成机制,笔者们选择了位于新疆天山北坡与准噶尔盆地过渡带的石河子草滩湖村湿地作为研究对象,通过挖取典型泥炭地层剖面,采用多种实验分析手段,获得该地区晚全新世期间较高时间分辨率的孢粉和植硅体资料,磁化率、粒度和烧失量等多项环境指标数据,通过提取气候与环境演变的相关信息,进行古环境重建,从而为以绿洲作为人类基本活动场所的新疆地区的湿地保护政策的制定提出参考依据。

1 取样区概况

1.1 取样区概况

研究区位于新疆石河子市北 9 km(图 1),新疆建

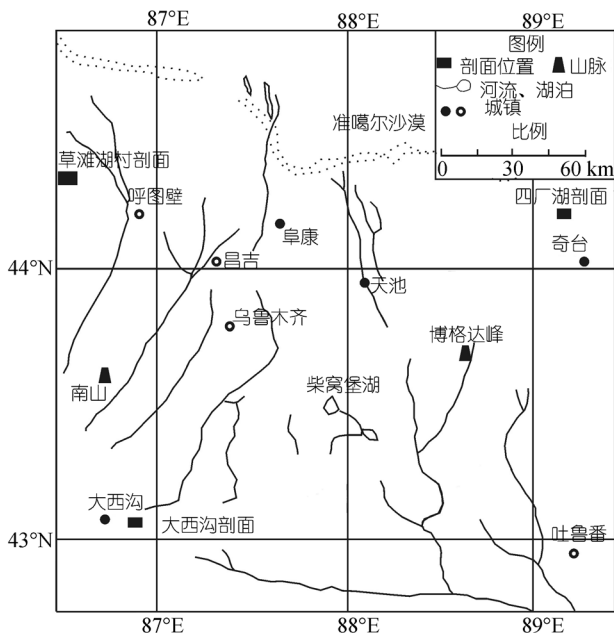


图 1 研究区地理位置

设兵团五连石河子总场一分场的北洼地,湿地类型为芦苇沼泽,面积 27.6 km²。地貌上属洪积扇缘泉水溢出带;气候为温带大陆性干旱气候,年平均气温 6.6℃,年平均降水量 201 mm,年理论蒸发量 1538 mm;未垦沼泽植物群落以芦苇(*Phragmites*)为优势,伴生种有水葱(*Scirpus tabernaemontani*)、茨藻(*Najas* sp.)等,盖度达 80%~90%。现在湿地大多已疏干并开垦为农田,种植棉花和大豆,但仍存有大面积苇湖(详见中国科学院中国湿地数据库)。该湿地的泥炭(又称草炭)是新疆草炭资源的集中分布区之一。泥炭作为一种重要的湿地资源,包含时间分辨率较高的、丰富的环境气候信息,是良好的古环境古气候记载体^[15]。中日双方科学家曾于 1997 年对石河子草炭进行过路线踏勘,估计草炭资源面积有 1 km²,厚度为 0.3~1 m^[16]。

1.2 剖面特征和采样鉴定

笔者等于 2002 年 7 月在天山中段北坡与准噶尔盆地过渡带的石河子草滩湖村湿地挖取深 175 cm 的人工剖面(44°25.06'N, 86°01.26'E, 海拔 380 m),2003 年 8 月在剖面东南 500 m 处又开挖了深 228 m 的剖面(44°25.03'N, 86°01.27'E, 海拔 385 m)。本文则以剖面为研究对象。整个剖面上部为劣质泥炭(或称草炭)层,中下部为黏土和黏质粉砂层。从剖面深 28~25, 45~42, 76~73, 112~109 和 175~172 cm 处分别采集 5 个沉积物全样进行常规 ¹⁴C 测年(¹⁴C 年代由国家地震局地质研究所 ¹⁴C 实验室分析测定),所测定年龄分别为(1210 ± 70) a BP ((1140 ± 100) cal. a BP), (1420 ± 60) a BP ((1310 ± 30) cal. a BP), (2890 ± 70) a BP ((3000 ± 135) cal. a BP), (4960 ± 190) a BP ((5660 ± 210) cal. a BP)和(8240 ± 575) a BP ((9240 ± 735) cal. a BP)。年龄与深度对应基本呈线性相关,采用线性内插方法获得整个剖面的年代序列。结果表明剖面为 9240 cal. a BP 以来的沉积地层,而剖面深 96~0 cm 的地层年代为 4550 cal. a BP。

此次研究主要针对深 96~0 cm 的地层,以 3 cm 间距采样,共取得 33 个样品。取重量为 30 g 样品,采用常规的酸、碱处理和重液浮选的方法进行花粉提取。通过对孢粉和植硅体(在 Olympus 光学显微镜 40 × 10 倍镜下进行鉴定和统计)观察统计 20 mm × 20 mm 的盖玻片 4~6 个,共统计孢粉总数约 56743 多粒。其中陆生植物孢粉近 10000 多粒,它们分属于 56 个植物科属(图 2)。其中,泥炭层每个样品统计陆生植物孢粉数

近300粒,深96~66 cm地层样品孢粉种类较少,但水龙骨科孢子统计量也可达数千粒.全部样品都含有较丰富的植硅体,总数达22807粒,其中共鉴定出植硅体10个形态类型:扇形(芦苇扇形、其他扇形)、方形、长方形、棒形(平滑棒形和锯齿棒形)、尖形、帽形、哑铃形、鞍形、齿形和不规则形.一些少量难以鉴定的类型,作为其他类型进行统计.将孢粉分析结果进行百分比和重量浓度计算,花粉百分比的计算是以占陆生植物花粉总和为基数;重量浓度采用不外加石松方法利用直接浓度法^[17,18]计算(单位:粒/g);在光学显微镜下根据炭屑长轴分<50 μm, 50~100 μm和>100 μm 3个等级统计炭屑;然后通过运用Tilia软件进行制图.另外,与孢粉样品同步,对剖面深66~0 cm的样品(以3 cm间距采集)同时测定粒度(采用Mastersizer2000型激光粒度仪)、磁化率(采用Malvern MS2型磁化率仪)及烧失量(LOI)(粒度、磁化率和烧失量测定均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成).

2 结果和分析

2.1 泥炭平均堆积速率

泥炭厚度沉积速率系指单位时间内泥炭沉积的高度.采用 $r = h/t$ 的计算公式,其中 h 为泥炭层厚度(单位:mm), t 为成炭时间(单位:a)^[19].以本泥炭剖面为例,泥炭深度在0~66 cm,其成炭时间约为(2493 ± 102) cal. a BP,则沉积速率平均为0.265 mm/a,均比中国东北地区(0.395 mm/a)和长白山地区(0.721 mm/a)晚全新世(2500 cal. a BP)以来的泥炭厚度沉积速率低.通常认为,泥炭积累速率大,表明植物生长量远远大于分解量,植物生长特别茂盛,或者分解十分缓慢,相反,泥炭积累速率小,则可能表明气候偏冷干或者偏暖干^[19].因此,新疆石河子地区2500 cal. a BP以来的干燥气候的变率较东北和长白山地区变化更大.

2.2 孢粉和植硅体记录

在分析的33个孢粉样品中,其中乔木植物主要有雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)和桦木属(*Betula*),其次有松属(*Pinus*)、落叶松属(*Larix*)、铁杉属(*Tsuga*)、冷杉属(*Abies*)、松科(Pinaceae)、柏科(Cupressaceae)、榆属(*Ulmus*)和柳属(*Salix*)等;中旱生灌木和草本主要有藜科(Chenopodiaceae)、蒿属(*Artemisia*)和麻黄属(*Ephedra*)等,其次有豆科(Leguminosae)、蔷薇科

(Rosaceae)、白刺属(*Nitraria*)和怪柳属(*Tamarix*)等;中生湿生草本有唐松草属(*Thalictrum*)、蓼属(*Polygonum*)、禾本科(Gramineae)、车前属(*Plantago*)、石竹科(Caryophyllaceae)、伞形科(Umbelliferae)、十字花科(Cruciferae)、唇形科(Labiatae)、旋花科(Convolvulaceae)、山萝卜属(*Scabiosa*)、老鹳草属(*Geranium*)、百合科(Liliaceae)和莎草科(Cyperaceae)等;湿生水生维管束植物有眼子菜属(*Potamogeton*)、黑三棱属(*Sparganium*)、香蒲属(*Typha*)、泽泻属(*Alisma*)和水鳖属(*Hydrocharis*);淡水绿藻有水绵属(*Spirogyra*)、双星藻属(*Zygnema*)和衣藻(*Chlamydomonas*)等;蕨类植物有水龙骨科(Polypodiaceae);苔藓中有高山苔(*Athalamia*)、石地钱(*Reboulia*)和泥炭藓(*Sphagnum*)等.

主要依据沉积物特征、百分比和重量浓度孢粉谱以及孢粉总浓度、乔木、灌木和草本以及蒿属、藜科等主要孢粉类型百分比含量变化,可将66 cm以上的泥炭层自下而上划分出5个孢粉带(图2,3).

带 (96~66 cm, 约4550~2500 cal. a BP), 孢粉组合中以灌木和草本植物花粉占优势,达95%以上,其中以藜科(22.3%~69.2%)、蒿属(10.3%~33.8%)和麻黄属(5.4%~22.9%)为主.而乔木植物和水生植物花粉百分含量则处于剖面最低值(均低于6%).水龙骨科孢子含量(16~113粒)也为剖面最低值.同样地,孢粉总浓度(177~3264粒/g)、水生植物花粉浓度(0~106粒/g)、水龙骨科孢子浓度(28~853粒/g)、乔木植物花粉浓度(0~42粒/g)、灌木和草本植物花粉浓度(191~2988粒/g)也均处于剖面最低值.此时A/C (*Artemisia*/Chenopodiaceae)比值却达剖面最高值(1.2).其次,植硅体鉴定表明带 是以棒形和尖形等指示冷干气候状况的植硅体类型为主(175~3189粒),而扇形和方形等指示暖湿气候状况^[20]的植硅体含量则较少(99~213粒).

带 (66~42 cm, 约2500~1810 cal. a BP), 孢粉组合中仍以灌木和草本植物花粉为主(89.2%~100%),但乔木植物花粉百分含量较带 有所增加(4.3%~11.4%).组合中水生植物花粉百分含量大幅度增高(其百分含量的计算是以占陆生植物花粉总和为基数,最高达28%左右),其中以双星藻、水绵和香蒲为主;水龙骨科孢子含量也较高(941~4778粒).尤其在剖面深60~57 cm处(2150~2000 cal. a BP,相当于200 BC~50 AD),孢粉总浓度(349~6784粒/g)、水生植物

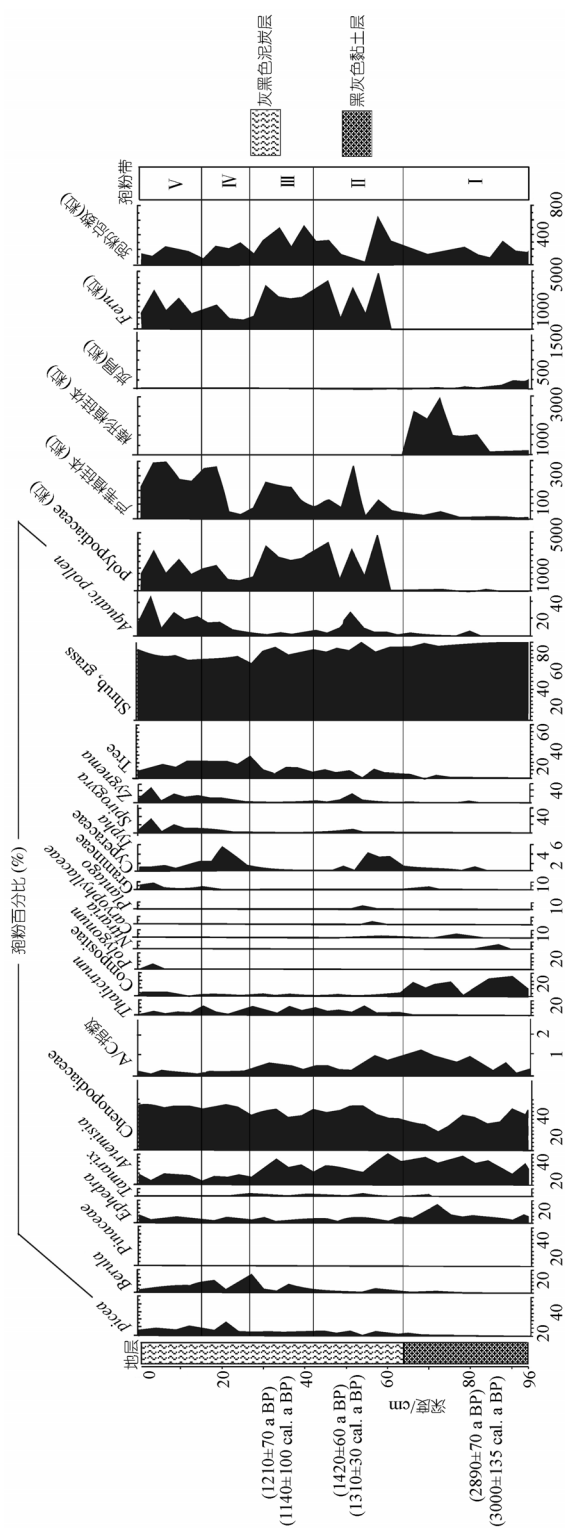


图 2 新疆草滩湖剖面 孢粉和植硅体图式

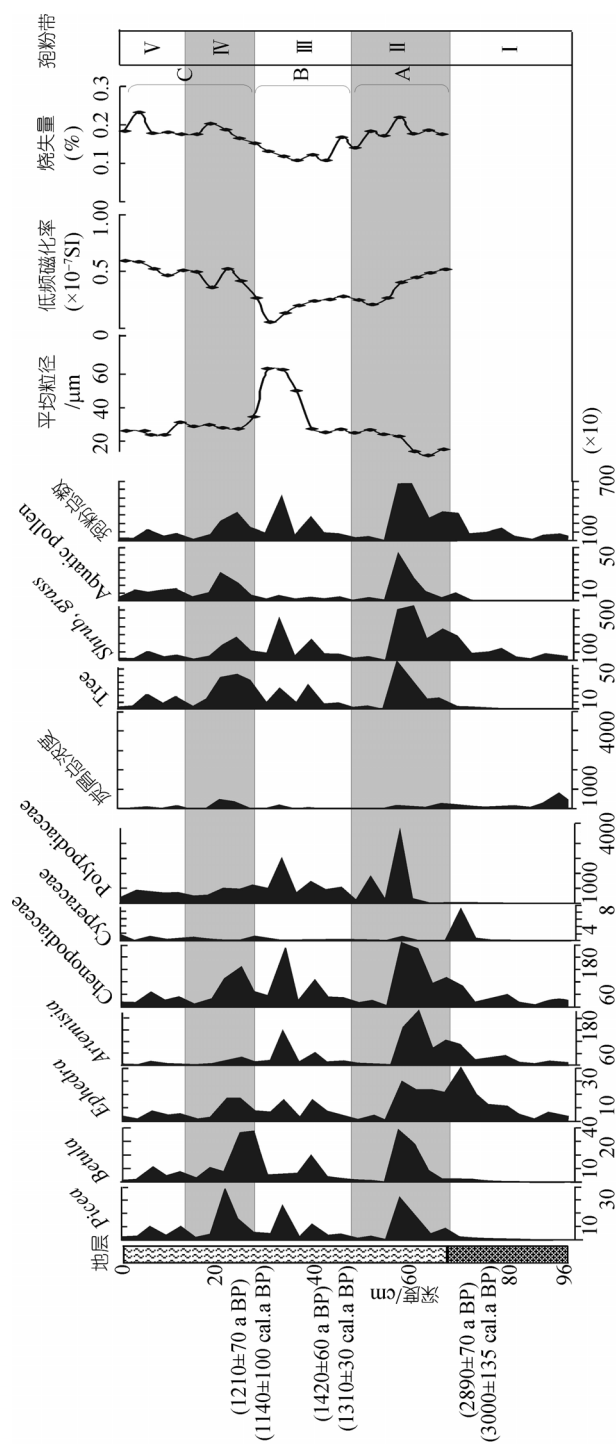


图 3 新疆草滩湖剖面 孢粉浓度(单位: 粒/g)、平均粒径、磁化率和 LOI 特征

花粉浓度(10~640 粒/g)、水龙骨科孢子浓度(565~50965 粒/g)、乔木植物花粉浓度(26~736 粒/g)、灌木和草本植物花粉浓度(326~6506 粒/g)均升至剖面最高值。其次, A/C 比值亦达剖面较高值(0.3~1.0)。另外, 植硅体鉴定表明带 中典型芦苇(*Phragmites*)植硅体含量较高(19~360 粒), 几乎未见尖形、棒形等指示冷干气候状况^[20]的植硅体。

带 (42~27 cm, 约 1800~1160 cal. a BP), 孢粉组合仍以灌木和草本植物为主(72.8%~94.1%), 但较带 略有减少, 其中藜科(36%~52.3%)和蒿属(9.3%~32%)百分含量较高; 而乔木植物花粉的百分比含量较带 又有所增加(5.9%~27.2%)。水龙骨科孢子含量则较带 略有减少(1180~3788 粒), 而水生植物花粉的百分含量也降至 5%, 只见极少的双星藻、水绵、莎草、香蒲、黑三棱和水鳖等属。其次, 孢粉总浓度(629~5482 粒/g)、水生植物孢粉浓度(24~74 粒/g)、乔木花粉浓度(80~378 粒/g)、灌木和草本花粉浓度(542~5115 粒/g)和水龙骨科孢子浓度(6960~30816 粒/g)均较带 降低; 但在剖面深 33~30 cm(1210~1190 cal. a BP)处, 花粉总浓度、灌木和草本、乔木花粉浓度和水龙骨科孢子浓度却形成了一个小峰值。尽管该带孢粉组合中的乔木植物花粉百分比含量较带 有所增加, 但其孢粉浓度均降低。另外, A/C 比值较带 也有所减少(0.2~0.6)。芦苇植硅体含量(82~250 粒)也较带 低。

带 (27~15 cm, 约 1160~650 cal. a BP), 孢粉组合中灌木和草本植物花粉仍占优势(72.8%~84.1%), 但乔木植物花粉含量却显著增加(15.9%~27.2%), 以至于在深 27 cm 处(1160 cal. a BP)达 27.2%, 其中桦木属花粉含量达 23.2%, 而在深 21 cm 处(970 cal. a BP)云杉属花粉含量也升至 16.6%。水生植物孢粉百分含量也较带 迅速增高至剖面的较高值(7%~23%), 其中以双星藻、水绵、香蒲和黑三棱为主。特别是在剖面深 24~21 cm (1140~970 cal. a BP), 孢粉总浓度(218~3328 粒/g)、水生植物(53~373 粒/g)和乔木植物(45~522 粒/g)花粉浓度均在剖面中形成较高值。此外, 更值得注意的是, 乔木植物中的云杉属(384 粒/g)和桦木属(373 粒/g)花粉浓度也均升至剖面最高值, 而灌木和草本花粉浓度(178~2775 粒/g)则较带 稍下降。其次, 水龙骨科孢子浓度(5706~12586 粒/克)却较带

显著减少, A/C 比值也降至 0.1, 但典型芦苇扇形植硅体含量却较带 增加, 并在深 21~18 cm 增至剖面

最高值(389 粒)。

带 (15~0 cm, 约 650 cal. a BP 以来)该带孢粉组合中灌木和草本植物花粉百分含量仍较高(77%~90%), 但乔木植物花粉却较带 迅速降低到 9.1%, 其中桦木属和云杉属花粉百分含量均低于 12%, 而藜科花粉百分含量则较带 略有增加, 达 50%~58%, 其他属种变化不大。水龙骨科孢子和水生植物花粉百分含量均较带 略有增高, 但总花粉浓度(218~1248 粒/g)、乔木植物(32~218 粒/g)、灌木和草本植物(258~1068 粒/g)和水生植物(53~160 粒/g)花粉浓度却较带 大幅度降低, 并降至剖面较低值; 其次, A/C 值仍偏低(0.1~0.3)。植硅体鉴定结果仍表明以芦苇扇形植硅体为优势。

2.3 粒度、磁化率和烧失量变化特征

依剖面粒度、磁化率和烧失量的垂直变化将本剖面 66 cm 以上明显地划分为 3 个带(图 3)。带 A (66~42 cm, 约 2500~1810 cal. a BP), 可与孢粉带 对应, 平均粒径较细(11.5~27.4 μm), 可能反映较弱的沉积动力环境, 但烧失量(14%~21%)和磁化率值($0.21 \times 10^{-8} \sim 0.52 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)却较带 B 高。带 B (42~27 cm, 约 1810~1160 cal. a BP), 与孢粉带 对应, 平均粒径较带 A 大幅度升高, 尤其在深 36 cm(1230 cal. a BP)处达剖面最高值(63.6 μm), 这可能反映较强的沉积动力环境, 磁化率和烧失量值却较带 A 和带 C 大幅度降低, 尤其在深 36 cm 磁化率值($0.06 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)和烧失量值(10.8%)降至剖面泥炭层的最低值。带 C (27 cm 以上, 约 1160 cal. a BP 以来), 与孢粉带 和带 V 对应, 平均粒径较带 B 逐渐减少, 在深 9 cm 处达 23.8 μm , 可能表明沉积动力逐渐变弱, 然而磁化率和烧失量值此时反而一致地逐渐上升, 使其在深 0~3 cm 处, 磁化率值($0.59 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)和烧失量值(23%)均成为剖面泥炭层的最高值。

烧失量值的大小是沉积物有机碳含量多少的反映, 在样品中有机质含量变化与古气候有着密切关系, 通常在有机碳相对含量高的阶段代表相对湿润气候, 而干燥的气候却不利于有机质的积累, 因此, 在人为因素影响较弱的区域, 烧失量的变化在某种程度上可以反映气候变化状况^[21,22]。在 1810~1160 cal. a BP 期间, LOI 值明显降低, 可能反映气候较干燥, 而其他时段的 LOI 值则较高, 可能表明气候较湿润, 植被覆被率较高, 湿润的环境成为有机质富积的重要条件^[21,22], 因而有机质积累增多。

环境磁学物质通常作为环境变化和气候过程的替代性指标,尤其在陆相地层中研究沉积环境中磁性矿物的含量,有助于重建古环境、恢复古气候^[23]。在一般情况下,磁化率值可反映降水量的大小。因为降水量越大,土壤中生物量也越大,生化反映越活跃,越有利于磁性矿物的产生,因此,磁化率的高低在某种程度上可以反映出当时的古气候条件^[23]。从图3可以看出,在1810~1160 cal. a BP期间,磁化率值和LOI值都较低,而平均粒径却较高,反映此时气候比较干燥,而在2500~1810 cal. a BP期间和1160 cal. a BP以来,磁化率、LOI值和水生植物含量均出现高值,平均粒径为低值,可见它们之间有着较好的对应关系,因此可以证明这两段时期处于湿润气候期。

值得注意的是,炭屑总浓度在深21 cm处(977 cal. a BP)出现2500 cal. a BP以来的小峰值,与磁化率高值对应很好。通常认为,土壤内部会由燃烧而形成较多的磁性氧化物,从而增强磁化率^[24],因此在一定程度上可以认为炭屑分布较高的地方与火有一定的关系。另外,如果是自然引起的火灾,当时生物量应该较多,从图3中可以看出,本带中的LOI值也比较高,可见当时生物量也较高。

3 讨论和结论

3.1 区域植被和环境演变综合分析

草滩湖村剖面孢粉分析揭示,该剖面深96~66 cm,约4550~2500 cal. a BP期间,岩性为黑灰色黏土,统计陆生植物孢粉总数达1988粒,平均每个样品仅为198粒,共鉴定出27个植物科属。其孢粉组合中以灌木和草本植物花粉占优势,不仅罕见乔木植物花粉,而且孢粉总浓度、水生植物花粉浓度、灌木和草本植物孢粉浓度均处于剖面的最低值。其次,指示气候冷干状况的尖型、棒状和长条形的植硅体含量却增至该剖面的最高值。这些组合特征表明此时气候较干,植被稀疏贫乏。此外,乌鲁木齐河水系东迁时,在塔尔雅依拉克沟口有一大断裂,覆有含盐壳和盐类的沉积层,为中全新世晚期至晚全新世的产物,这是典型高温干旱过程的环境产物^[25,26],而该地层沉积记录时段与4550~2500 cal. a BP期间较为吻合。

而在深66~0 cm(约2500 cal. a BP以来),岩性为灰黑色劣质泥炭,鉴定出孢粉种类较多,共43个科属,统计孢粉总数为56000多粒,占整个剖面孢粉总数的90%以上,其中陆生植物孢粉总数达5934粒,

约占整个剖面孢粉总数的60%,每个样品平均统计近300粒。其孢粉组合特征表明不仅孢粉总浓度、水生植物花粉浓度、灌木、草本和乔木植物花粉浓度要比4550~2500 cal. a BP时段显著增高,而且通常指示温暖湿润气候的扇形植硅体及其他指示暖型气候的植硅体(方形、长方形和哑铃形)亦含量较高,由此可以看出,2500 cal. a BP以来草滩湖区物种较为丰富,植被繁盛,水生植物种类多,植硅体以扇形植硅体为主,其中又以典型芦苇扇形占优势。泥炭是在沼泽环境下形成的,它在干旱区的存在往往就是湿润气候的指示^[27];根据以往研究,新疆其他区域的泥炭发育也主要集中于全新世气候适宜期和3~2 ka BP之间的显著湿润期^[28]。此外,取部分样品进行泥炭植物残体鉴定,鉴定结果也多为苔草和芦苇,这些都是典型沼泽植被。可见最近2500年以来,气候比较湿润。另外,从整个剖面看,泥炭层的炭屑总浓度较非泥炭层显著降低,可能是2500 cal. a BP以来虽然生物量较高,但气候较为湿润,不利于火的形成。但需指出的是,2500 cal. a BP以来的孢粉组合始终稳定出现占有优势的藜科多个属种和蒿属、麻黄等荒漠植物的花粉,说明在广域上,当地2500 cal. a BP以来湿地周边的地带性植被仍为荒漠植被,并未发生根本变化。

再根据上述花粉记录和组合特征,再结合平均粒径、磁化率以及烧失量(LOI)的测定结果,着重对2500 cal. a BP以来的古气候和环境演变分析如下:

2500~1810 cal. a BP(550 BC~140 AD),孢粉总浓度、水生植物、灌木和草本、乔木植物花粉浓度均成为剖面的最高值,以芦苇为优势的扇形植硅体及其他指示暖湿气候状况的植硅体含量也达剖面的较高值;其次,灌木、草本、水生植物孢粉和水龙骨科孢子含量亦成为剖面的最高值;而且磁化率相对高值与LOI的相对高值相对应,但其粒径却比较细,总体上看此时气候状况较好,应较今湿润,但后期一度出现了气候变干的趋势。当时研究区内有大量的芦苇、香蒲等挺水植物和喜淡水、静水的绿藻得以生长,形成隐域性沼泽湿地景观,然而湿地周边区域则为荒漠草原景观,植物组成以藜科、蒿属、菊科和唐松草属为主。南疆博斯腾湖^[29]和塔里木盆地南缘的尼雅剖面^[30]的地层记录结果也表明该段时期气候较为湿润。Yang等人^[31]根据古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 和冰川积累量序列以及其他代用资料,也认为在2.2~1.8 ka BP期间整个西北地区气候湿润。此时相当于历史上的秦

汉时期,当时新疆湖泊发展,河流水量大,罗布泊“广轮400余里”,有14000人口的楼兰古国曾在此区域兴起,楼兰镇林木繁茂,田园丰饶^[6,25,26],可见当时气候较今湿润。

1810~1160 cal. a BP(140~790 AD),却出现与2500~1810 cal. a BP相反的情况。孢粉总浓度、水生植物、灌木和草本植物、乔木植物花粉浓度均较低,鉴定的水生植物花粉和水龙骨科孢子含量也处于低值;其次,典型扇形植硅体含量也明显低于带;而且,磁化率和LOI值同时出现低值,反映气候变干,周边区域呈现荒漠景观,植被以藜科和蒿属为主;沼泽湿地水体变浅,水生植物含量大幅度减少,但仍有一些芦苇生长。出土的怯卢文书记载了位于罗布泊西北畔的楼兰王国都城约在四世纪时,因用水紧张,口粮日趋减少并出现了严重干旱^[25,26]。

1160~650 cal. a BP(790~1300 AD),此时孢粉总浓度、水生植物含量和浓度、灌木和草本植物孢粉浓度及乔木植物花粉浓度均在剖面上出现较高值,扇形植硅体及其他指示暖湿气候的植硅体含量再次增高;尽管灌木和草本孢粉的百分含量较带又有所下降,但由桦木属和云杉属组成的乔木植物花粉含量却显著增高;特别是在1160 cal. a BP左右,其含量高达27.2%,其中桦木属孢粉含量增至23.2%。此孢粉组合特征反映湿生植被较多,草本植物旺盛,植物多样性丰富,就大区域性植被看,应为荒漠草原。杨振京^[32]在沿一条从天山博格达峰附近雪线至古尔班通古特沙漠的长约100 km,宽约20 km的样带上采集80个表土花粉,鉴定出的桦木属花粉百分含量不足3%;其次,在天山乌鲁木齐河源区的大西沟,从一号冰川前缘开始沿山谷向下直到谷口,按海拔100 m间隔采集的14块表土样品中所鉴定的该花粉最高含量亦为0.1%;另外,在天池气象台站、中国科学院阜康荒漠生态系统定位研究站和北沙窝草炭试验的3个风标式空气花粉收集器采集的2001年7月至2002年7月的114个空气花粉雨样品中的桦木属花粉最高含量也仅为3%。而且,在位于天山北坡不同海拔高度的剖面,如乌鲁木齐河源区的大西沟剖面(海拔3450 m)^[33]、吉木萨尔县前山丘陵区的桦树窝子剖面(海拔1320 m)、小西沟剖面(海拔1360 m)^[34]、古尔班通古特沙漠东南缘丘间洼地的四厂湖剖面(海拔589 m)^[35]和乌鲁木齐河下游尾间湖泊的东道海子剖面(海拔430 m)^[36],采集的样品中鉴定出的桦木属花粉最

高含量均未超过10%。由此可以看出不仅是现代花粉传播还是地层花粉的研究,天山的桦木属植物花粉的百分含量均难以达到如此高值。因此,草滩湖村剖面桦木属花粉百分含量峰值的存在,可能表明此时的桦木较云杉则更耐盐和干旱,有可能生长在沼泽湿地的高岗地,指示当时的自然环境较今要好。沼泽桦和盐生桦现今就生长在阿尔泰河谷冻土沼泽地带,则可能作为桦木在低海拔沼泽地带生长的一个佐证^[37];也可能是由于当时降水充沛,气候较湿润,云杉林线下移,导致由洪流或者是经风带至草滩湖村湿地的云杉和桦木属花粉含量均增高。根据历史记载,在永隆元年(939 AD),后晋天福时期,风雪灾害严重。北宋开宝三年(970 AD),“高昌(今吐鲁番一带)及雨五寸,庐舍多坏”(《宋书》),这段时期在时间上与剖面上雪岭云杉和桦木属的最高含量的时期较为吻合^[25,26]。因此根据诸多历史记载,至少表明当时的气候较为湿润。

另外,该段时期即相当于欧洲的“中世纪温暖期”(900~1300 AD)。中世纪暖期在都兰树轮记录中较强^[38],祁连圆柏2326年来的树轮年代记录也表明,在929~1031 AD的中世纪温暖期期间是以暖春天气持续时间较长为特点^[39]。其次,地处天山北麓的四厂湖剖面(44°18'36"N, 89°8'36"E; 海拔589 m)的孢粉、粒度、磁化率、烧失量等资料的分析可以看出在(1000±65)~(665±50) cal. a BP期间,水生植物花粉含量和花粉浓度均处于整个剖面的最高值,A/C比值要比其他时段显著增高,反映该时期植被覆被率较高,气候较湿润^[35];天山乌鲁木齐河源大西沟剖面(43°07'104"N, 86°51'235"E; 海拔3450 m)在1400~600 cal. a BP期间,雪岭云杉花粉的百分含量和花粉浓度均较高,孢粉总浓度、乔木植物、灌木和草本以及水生植物花粉浓度也均处于高值,表明该时段气候较为湿润^[33]。艾比湖的沉积相和孢粉分析也表明由于气候波动曾引起艾比湖水位明显变化,约300~1400 AD,即东晋至15世纪初,是艾比湖的高水位时期^[9]。此外,1500~500 a BP期间中国西部地区的一些湖泊(柴窝堡湖、巴里坤湖和青海湖等)也大多处于水位上升时期^[40~42],表明当时气候比较湿润。新疆吉木萨尔地区北庭古城东河坝剖面深0.15~0.6 m,¹⁴C测年为(590±80) cal. a BP,属元末明初时期,孢粉和沉积相研究均表明,该层水生植物含量较高,以香蒲和芦苇为主,沼生莎草科植物也很多^[43]。此外,王富葆等从罗布泊湖心采集

的大量的植物种子,多属莧齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、光叶眼子菜(*Potamogeton lucens*)、水葱以及芦苇等沉水和挺水植物,还见有丰富的介形虫、轮藻和螺等,其测年为 871 cal. a BP¹⁾。这些剖面证据均表明天山北麓“中世纪”时期的气候特征是以湿润为主,至若涉及当时的温度和湿度的配置关系的证据仍显示不足,尚需在今后工作中加强研究。

650~0 cal. a BP(1300 AD 至今),此时孢粉总浓度、水生植物、灌木和草本植物孢粉浓度、乔木植物花粉浓度再次降为剖面的低值,而灌木和草本植物孢粉百分含量较带有所升高,但乔木植物花粉百分含量却显著减少。因此,反映气候较前一时期偏干,植被变的稀疏。但芦苇扇形植硅体含量却较高,反映当时沼生水生植被仍以芦苇占优势。另据历史记载则表明元末时期,在新疆东部出现干旱,地不能下种,靠甘肃赈粮,由此可知,孢粉带 V 前期气候干旱程度较为显著。

3.2 洪积扇地貌对花粉传播的影响

干旱、半干旱地区的洪积扇是由暂时性洪流挟带的沙、石块堆积在山前一带形成的一类体积大坡度小的扇状堆积体。潜水往往在粗、细相接触的扇顶锥边缘出露并成为弧状态成串排列的泉或池沼,成为主要的潜水溢出带^[44],草滩湖村 2500 年以来沼泽湿地就是形成于这一特定地带。由于洪积扇多半由干旱、半干旱地区季节性河流形成,干湿季比较明显,雨季有大量流水,形成洪积扇,干季断流,地表水下渗到洪积扇的下部贮存起来。湿润季节的洪流对花粉的传播影响很大,沼泽湿地沉积物花粉是当地多年洪流的产物,因此,对该泥炭层花粉组合的解释宜考虑洪流对花粉传播的影响^[45,46]。在相当于“中世纪温暖期”的 1160~650 cal. a BP,当时气候比较湿润,云杉林线下移^[34],被洪流带入草滩湖的云杉和桦木属花粉可能性要大,使得在草滩湖孢粉组合中云杉属百分含量高达 17.6%左右。

另外,剖面中出现的大量的水龙骨科孢子,这也可能受到洪积扇洪流的影响。水龙骨科孢子泥炭层含量和浓度均很高,而在泥炭层之下的黏土层中则显著降低,甚至在有的样品中完全消失。就草滩湖村剖面鉴定的孢子类型有两种:一种是外壁表面为

圆瘤状突起的单缝豆形孢;另一种类型是外壁光滑的单缝豆形孢(见图 4)。尽管在孢粉组合中水龙骨科孢子常占重要地位,但从其形态上难以确定其属种^[47,48]。根据《新疆植物志》第一卷记载,水龙骨科在天山有两种:一种是天山瓦苇(*Lepisorus albertii*),适宜生长在中山至亚高山林缘石缝中,海拔高度为 1500~2500 m;另一种为欧亚多足蕨(*Polypodium vulgare*),喜生长在山地林下或林缘石缝里,海拔为 1700~2000 m^[37],而在荒漠草原地区则缺少生长水龙骨科孢子的记录。根据以往孢粉学研究认为,蕨类植物孢子随风飞行的能力是比较差的,主要是靠水流搬运。徐家声^[49]通过 2 次对黄海大气中的孢粉分析,仅各发现 1 粒凤尾蕨属(*Pteris*)的孢子,朱艳等人^[50]在检测中国西北石羊河流域空气长距离传播孢粉时的数据表明,随着孢粉源的距离的增加,空气中的蕨类植物孢子的数量显著下降。杨振京^[32]在天山北坡样带上采集的表土花粉样品中,均未鉴定有水龙骨科孢子;其次,在乌鲁木齐河源区大西沟采集的 14 块表土样品中所鉴定的水龙骨科孢子数量亦极少,仅 2~3 粒;另外,在天山 3 个空气花粉收集点采集的 2001 年 7 月至 2002 年 7 月的 114 个空气花粉雨样品中,仍未发现水龙骨科孢子。而在草滩湖村剖面水龙骨科孢子却明显集中在深 66 cm 以上(2500 cal. a BP 以来)的泥炭层中,66 cm 以下的地层则较为少见,尤其在深 66~42 cm 处其浓度达最高值(50965 粒/g);而孢粉资料表明此时气候较湿润,所以根据它们的生长所处的海拔和喜温湿的气候来看,因此推测该孢子属外来花粉搬运的可能性比较大。另外,从剖面上看水龙骨科孢子含量与水生植物含量的变化特点并不完全一致,这可能是因为该区沉积环境不是完全封闭的,湿地沉积物的花粉可能是当地多年洪流的



图 4 水龙骨科孢子

1) 王富葆. 近一万年来罗布泊沉积的环境记录. 见: 香山科学会议第 254 次学术讨论会筹备组, 主编. 罗布泊地区环境变迁和西部干旱区未来发展. 香山科学会议第 254 次学术讨论会, 2005. 28—33

产物,而水生植物花粉只能反映湿地区域环境,但不能用于解释大范围 and 区域植被情况,需辅助其他环境指标;另外,水龙骨科孢子在干旱区的环境意义较为特殊,在新疆野外调查中发现它多位于海拔较高湿度较大的山区,其生长地可能代表环境较为湿润。因此,在气候湿润时期,水龙骨科孢子被流水带到潜水溢出带的量可能远高于干季时的孢子含量。在华北平原冲积物中出现的蕨类孢子多是河流从山区搬运而来^[45];在北京房山坟庄剖面因处于冲积扇面的前缘洼地,也有利于地带性花粉和区域性花粉随水流的沉积^[46]。另外,就本剖面而言,样品中出现的大量水龙骨科孢子究其来源和在植被的代表性,尚需要得到更多剖面和表土、河流花粉传播机理的证据,才能对其在植被和气候上的代表性作出进一步推测。因此尚需要沿洪积扇的不同海拔高度采集表土花粉样品进行鉴定,如果沿途都有水龙骨科孢子大量出现,则可以推测其是由水流从高海拔处搬运而来,否则就另当别论。

El-Moslimany^[51]最早采用 A/C 比值来指示气候的干湿程度^[12,52],孙湘君等人^[53]则通过研究干旱和半干旱区蒿属和藜科花粉分布规律后,提出 A/C 比值可以作为区分草原和荒漠植被的指标,在典型荒漠地区, A/C 比值小于 0.5,而草原地区的比值通常大于 1。如按此项指标推测,草滩湖村剖面在 4550~1810 cal. a BP 时, A/C 比值达到剖面最高值(1.2), 2500~1810 cal. a BP 期间,该值降低为 1.0, 1810~1160 cal. a BP 时又较带减少(0.2~0.6), 1160~650 cal. a BP 时该比值继续减少至 0.1,而 651 cal. a BP 至今,其值仍偏低,似乎该剖面的 A/C 比值并不能作为区分草原和荒漠植被的指标,也无法反映气候的干湿程度。刘鸿雁¹⁾根据对新疆尾间湖表土孢粉研究结果后,提出如果尾间湖流经整个山地垂直植被带, A/C 比值指示环境意义减少,而如果流经的只是基带植被带, A/C 比值在一定程度上才可以指示环境干湿变化^[54]。可见洪积扇特殊的地貌类型对 A/C 比值

的影响也较大。另外,根据王琰瑜等人^[55]的研究认为 A/C 比值可在一定程度上反映人类对草原植被的干扰和影响程度,当草原受人为干扰活动越强烈,则 A/C 比值有减少的趋势。由于草滩湖村剖面位于洪积扇的潜水地带,深 96~0 cm 自下而上 A/C 比值逐渐减少,这可能在一定程度上反映是受人类活动干扰的结果。所以对干旱、半干旱区的地层孢粉资料作出解释时,由于 A/C 比值对环境的指示意义只在一定范围内适用,因此需要结合表土花粉研究结果进行综合考虑。

3.3 草滩湖村剖面 和 研究结果比较

草滩湖村剖面 和剖面 的孢粉和植硅体的初步研究结果都表明泥炭层中所鉴定统计的孢粉种类、数量、总的孢粉浓度和水生植物花粉浓度都明显较黏土层高,植硅体中的典型芦苇扇型及扇型植硅体占优势,而黏土层以尖型和棒型植硅体为主,因此都揭示出泥炭层形成以来气候比较湿润,湿地发育、淡水水生植物丰富,而之前气候比较干旱。

剖面 的泥炭层厚度为 66 cm,成炭时间为(2493 ± 102) cal. a BP 以来;剖面 的泥炭层厚为 56 cm,则成炭年龄为(2445 ± 170) cal. a BP。2 个剖面成炭初始时间相近,因此推测本区泥炭形成年代即为 2500 cal. a BP 左右,在 3~2 ka BP 期间本区气候可能出现了一次从干到湿的“转型”过程。

在孢粉分析中通常较少顾及的蕨类植物中的水龙骨科孢子在 2 个剖面的泥炭层中的孢粉组合相对含量和“绝对浓度”均很高,但在非泥炭层中则显著降低;在剖面 和 地层上部的桦属花粉百分含量较高,这些现象是否能直接反映当地的原生植被状况还是受水流、大气的传播的影响?在干旱区,大风和暂时性洪流是极常见的自然现象^[50]。由于草滩湖村湿地的地貌属洪积扇缘泉水溢出带,无疑对花粉传播和沉积产生一定的影响。那么,湿地沉积物的花粉是否是当地多年洪流的产物、还是林线水平或垂直移动的结果^[34]? 这些孢粉学基础性研究有待做出进一步回答。

参考文献

1 陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 1—2

1) 刘鸿雁. 内蒙古中部半干旱区表土花粉的空间格局及其对荒漠化驱动因子的指示意义. 见: 中国古生物学会孢粉学分会, 主编. 中国古生物学会孢粉学分会七届一次学术年会, 2005. 61

- 2 Genever M, Grindrod J, Barker B. Holocene palynology of Whitehaven Swamp, Whitsunday Island, Queensland, and implications for the regional archaeological record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2003, 201(1-2): 141—156 [\[DOI\]](#)
- 3 买买提·阿不都拉. 新疆湿地现状与保护. *新疆林业*, 2001, 4: 4—5
- 4 刘东生, 李泽椿, 丁仲礼. 自然历史卷“西北地区自然环境演变及其发展趋势”. 见: 钱正英, 沈国舫, 潘家铮, 主编. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究. 北京: 科学出版社, 2004. 16—254
- 5 王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变(第一卷). 见: 秦大河, 主编. 中国西部环境演变评估. 北京: 科学出版社, 2002. 197—198
- 6 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219—226
- 7 Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. Recent and future climate change in Northwest China. *Clim Change*, 2007, 80(3-4): 379—393 [\[DOI\]](#)
- 8 Rhodes T, Gasse F, Lin R F, et al. A Late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Zunggar (northern Xinjiang, western China). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1996, 120(1-2): 105—121 [\[DOI\]](#)
- 9 阎顺, 穆桂金, 远藤邦彦, 等. 2500 年来艾比湖的环境演变信息. *干旱区地理*, 2003, 26(3): 227—232
- 10 吴敬禄, 沈吉, 王苏民, 等. 新疆艾比湖地区湖泊沉积记录的早全新世气候环境特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(6): 569—575
- 11 Ma Z B, Wang Z H, Liu J Q, et al. U-series chronology of sediments associated with Late Quaternary fluctuations, Balikun Lake, northwestern China. *Quat Int*, 2004, 121(1): 89—98 [\[DOI\]](#)
- 12 Wünnemann B, Mischke S, Chen F H. A Holocene sedimentary record from Bosten Lake, China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 234(2-4): 223—238 [\[DOI\]](#)
- 13 陈虎, 黄小忠, 张家武, 等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(12): 1280—1290
- 14 夏训诚, 赵元杰, 王富葆, 等. 罗布泊地区红柳沙包年层的环境意义探讨. *科学通报*, 2005, 50(20): 2395—2397
- 15 Hong Y T, Wang Z G, Jiang H B, et al. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time series from peat cellulose. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 185(1-2): 111—119 [\[DOI\]](#)
- 16 王周琼, 李述刚, 川上敬, 等. 荒漠化防治丛书——草炭绿化荒漠的实践与机理. 北京: 科学出版社, 2001. 23—36
- 17 Davis M B. A method for determination of absolute pollen frequency. In: Kummel B, Raup D, eds. *Handbook of Paleontological Techniques*. Freeman: San Francisco, 1965. 674—686
- 18 阎顺, 孔昭宸, 杨振京, 等. 新疆表土中云杉花粉与植被的关系. *生态学报*, 2004, 24(9): 2017—2023
- 19 赵红艳, 冷雪天, 王升忠. 长白山地泥炭分布、沉积速率与全新世气候变化. *山地学报*, 2002, 20(5): 513—518
- 20 吕厚远, 刘东生, 秦小光, 等. 150 ka 来宝鸡黄土植物硅酸体组合季节性气候变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(2): 131—136
- 21 Hakanson L, Jansson M. *Principles of Lake Sedimentology*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 1—316
- 22 Lerman A. *Lake: Chemistry, Geology, Physics*. New York: Springer-Verlag, 1978. 1—363
- 23 Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism*. London: Academic Press, 2003. 1—293
- 24 Thompson R, Oldfield F. 环境磁学. 严尧基, 吴邦灿, 编译. 北京: 地质出版社, 1995. 57—69
- 25 李江凤. 新疆年轮气候年轮水文研究. 北京: 气象出版社, 1990. 1—287
- 26 李江凤. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991. 1—287
- 27 钟巍, 王建民. 全新世新疆自然环境演变初论——地质记录及演变序列. *干旱区资源与环境*, 1994, 8(4): 9—16
- 28 钟巍, 李丽雅. 新疆全新世自然环境演变的几个重要时间界线. *新疆大学学报(自然科学版)*, 1996, 13(2): 78—84
- 29 钟巍, 熊黑钢. 近 12 ka BP 以来南疆博斯腾湖气候环境演变. *干旱区资源与环境*, 1998, 12 (3): 28—35
- 30 钟巍, 熊黑钢, 塔西甫拉提. 南疆地区历史时期气候与环境演化. *地理学报*, 2001, 56(3): 345—352
- 31 Yang B, Achim B, Shi Y F, et al. Evidence for a late Holocene warm and humid climate period and environmental characteristics in the arid zones of northwest China during 2.2 ~ 1.8 kyr B.P. *J Geophys Res*, 2004, 109, D02105, doi: 10.1029/2003JD003787 [\[DOI\]](#)
- 32 杨振京. 新疆天山中段北坡地区现代孢粉学研究. 博士后研究报告. 北京: 中国科学院植物研究所, 2004. 22—91
- 33 Zhang Y, Kong Z C, Ni J, et al. Late Holocene palaeoenvironment change in central Tianshan of Xinjiang, northwest China. *Grana*, 2007, 46(3): 197—213
- 34 张芸, 孔昭宸, 阎顺, 等. 天山北麓晚全新世云杉林线变化和古环境特征. *科学通报*, 2006, 51(12): 1450—1458
- 35 张芸, 孔昭宸, 阎顺, 等. 新疆地区的“中世纪温暖期”——古尔班通古特沙漠四厂湖古环境的再研究. *第四纪研究*, 2004, 24(6): 701—708

- 36 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
- 37 新疆植物志编委会. 新疆植物志(第一卷). 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1992. 234—242
- 38 姚檀栋, 杨梅学, 康兴成. 从古里雅冰芯与祁连山树轮记录看过去 2 000 年气候变化. 第四纪研究, 2001, 21(6): 514—519
- 39 Zhang Q B, Cheng G, Yao T, et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan plateau. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(14), 1739, doi: 10.1029/2003GL017425 [DOI](#)
- 40 李栓科. 中昆仑山区封闭湖泊湖面波动及气候意义. 湖泊科学, 1992, 4(11): 19—30
- 41 王苏民, 王富葆. 全新世气候变化的湖泊记录. 见: 施雅风, 孔昭宸, 主编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 146—149
- 42 钟巍, 韩淑媛. 中国西部内陆型晚冰期环境特征的湖相沉积记录. 湖泊科学, 1998, 10(3): 1—7
- 43 阎顺, 阚耀平. 吉木萨尔地区历史时期环境演变与人类活动. 干旱区地理学集刊, 1993, 3: 162—175
- 44 王飞燕, 王富葆, 王雪瑜. 地貌学与第四纪地质学. 北京: 高等教育出版社, 1991. 40—44
- 45 许清海, 李润兰, 朱峰, 等. 华北平原冲积物孢粉沉积相研究. 古地理学报, 2001, 3(2): 55—63
- 46 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋. 北京地区不同沉积环境对孢粉沉积影响的分析. 沉积学报, 1997, 15(增刊): 57—63
- 47 中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组. 中国蕨类植物孢子形态. 北京: 科学出版社, 1976. 343—346 [DOI](#)
- 48 张碧波, 王任翔, 常艳芬, 等. 中国西南地区水龙骨科植物(水龙骨科)孢子形态研究. 武汉植物学研究, 2006, 24(2): 113—118
- 49 徐家声. 黄海大气中的孢粉及其对海底沉积物中孢粉组合的影响. 植物学报, 1994, 36(9): 720—726
- 50 朱艳, 陈发虎, 刘虎俊, 等. 石羊河流域空气传播孢粉的初步研究. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(2): 100—105
- 51 El-Moslimany A P. Ecological significance of common nonarboreal pollen: Examples from drylands of the Middle East. *Rev Palaeob Palynol*, 1990, 64(1-4): 343—350
- 52 Herzsuh U. Reliability of pollen ratios for environmental reconstructions on the Tibetan Plateau. *J Biogeogr*, 2007, 34(7): 1265—1273 [DOI](#)
- 53 孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁. 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
- 54 Liu H Y, Wang Y, Tian Y H, et al. Climatic and anthropogenic control of surface pollen assemblages in East Asian steppes. *Rev Palaeob Palynol*, 2006, 138(3-4): 281—289 [DOI](#)
- 55 王琚瑜, 宋长青, 孙湘君. 内蒙古中部表土花粉研究. 植物学报, 1996, 38(11): 902—906