

硕士学位论文

艾比湖地区中全新世以来孢粉组合与
古气候定量重建

硕士研究生：赵凯华

导师：杨振京 研究员 孙爱群 教授

申请学位级别：硕士

学科、专业：第四纪环境与构造地质学

答辩日期：2013年6月1日

授予学位单位：石家庄经济学院

石家庄经济学院

2013年6月1日

**A Dissertation Submitted to
shijiazhuang University of Economics
For the Academic Degree of Master**

**Palynological assemblages and
Paleoclimate quantitative reconstruction
in the Ebinur Lake region since the
Holocene**

Candidate: Zhao Kaihua

Supervisor: Research Fellow Yang Zhenjing Professor Sun Aiqun

Academic Degree Applied for: Master

Specialty: Quaternary environmental and structural geology

School/Department: Shijiazhuang University of Economics

Shijiazhuang University of Economics

June, 2013

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是我在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得石家庄经济学院或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解石家庄经济学院有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘 要

内陆干旱、半干旱封闭湖泊对气候变化的响应十分敏感，是较为理想的古环境研究场所，而且湖泊沉积物的孢粉组合可以直接反映湖区的植物群落面貌和植被类型，因而成为一项重要的古气候研究内容。艾比湖位于准噶尔盆地西南，是这一区域的汇水中心。取自艾比湖地区214个表土孢粉样品，结合附近18个气象台站1970-2000年30年的气象数据以及艾比湖东南方向1.7米深的剖面，运用WAPLS（加权平均最小二乘法）定量重建了艾比湖地区中全新世以来的古气候演变过程：在4730-4014a B.P. 之间，艾比湖地区表现为较冷湿的气候特征，平均气温 -2.8°C ，平均降水量270.5mm；在4014-2780a B.P. 之间，降水量较少，平均降水量252.5mm，而且温度较低，平均气温 -3.5°C ，整个艾比湖地区表现为荒漠植被景观，显示了冷干的气候条件；在2780-2382a B.P. 之间，温度升高，平均 -2.9°C ，较上一带温度上升；降水量在299-400mm之间，平均351mm，流域内河流水量大充沛，艾比湖处于高湖面期；在2382-2134a B.P. 期间，平均气温 -1.8°C ，平均降水量为216mm，温度升高，降水减少，是艾比湖面积缩小时期，湖周为荒漠植被景观。有证据表明当时整个新疆北部地区可能呈现暖干的气候环境。在2134-1437a B.P. 之间，平均温度 -0.6°C ，平均降水量为310mm，气温上升，降水量增大，流域河水量较大，湖面较高；在1437-131a B.P. 之间，平均温度为 0.7°C ，平均降水量为339mm，总体来看，温度升高，降水量增加，艾比湖处于高水位期，这反映了在中世纪，艾比湖地区的环境可能明显好于现代。本段后期看，蕨类孢子的增多以及温度的下降可能显示的是约17世纪中至19世纪初的小冰期，艾比湖地区处于西风带，受季风影响很弱，在气候冷期，受源于大西洋的西风带强烈南移及其气旋风加强影响，带来较多的水汽。此时的艾比湖水位处在一个相对上升期。近200年来，由于人类活动的影响，艾比湖地区日益干旱，湖滨地区荒漠化程度加剧，成为中国西部沙尘暴主要策源地之一。

关键词：孢粉；定量重建；古气候；艾比湖；新疆

Abstract

The inland arid, semi-arid closed lakes the response is very sensitive to climate change, so it is the ideal paleoenvironmental research sites, and palynological assemblages of lake sediments can directly reflect the landscape and vegetation types of plant communities in the Lake District, and thus become an important paleoclimate research. Ebinur Lake is located in the Junggar Basin of the southwest, is the center of this catchment area. 214 surface pollen samples taken from the Ebinur Lake region, combined with a near 18 meteorological stations in the 30 years 1970-2000 meteorological data and the the Ebinur Lake easterly direction 1.7 meters deep profiles use WAPLS (weighted average method of least squares) quantitative Ebinur Lake region since the mid-Holocene paleoclimate reconstruction evolution: between 4730-4014a BP Ebinur Lake region showed a cold wet climate characteristics, the average temperature of -2.8°C , average precipitation 270.5mm; in between 4014-2780a BP less precipitation, average precipitation is 252.5mm, and low temperature, average temperature of -3.5°C the the Ebinur Lake region as a whole desert vegetation landscape shows a cold and dry climate conditions; in 2780 -2382a BP between temperature rise, an average of -2.9°C temperature rise compared to the previous vicinity; precipitation between 299-400mm, average 351mm, river water within the basin plenty Ebinur Lake in the high lake period; in 2382 - 2134a BP, the average temperature of -1.8°C , the average annual rainfall is 216mm, elevated temperatures and decreased precipitation Ebinur Lake area of narrow period, the Lake weekly desert vegetation. Some evidence indicates that the entire northern region of Xinjiang may show a warm and dry climate environment. Between 2134-1437a BP, the average temperature of -0.6°C and an average rainfall of 310mm, rising temperatures, increased precipitation, river basin of water, the lake is higher; between 1437-131a BP, with an average temperature of 0.7°C , the average annual rainfall is 339mm, Overall, temperature increases, precipitation increases, Ebinur Lake in the high-water period, which reflects the environment in the Middle Ages, Ebinur Lake area may be significantly better than modern. The segment late watching, fern spores increase the temperature drop may show the Little Ice Age about the 17th century to the early 19th century, the Ebinur Lake region in the westerlies, affected by the monsoon is weak, in cold climate period, by stems from Atlantic westerlies strongly southward gas the cyclone strengthened affect, bring more water vapor. Ebinur Lake water level in a relative

period of rise. Nearly 200 years, due to the impact of human activities, the the Ebinur Lake region growing drought, intensified desertification of lakefront, become one of the main source of dust storm in western China.

Key words: Pollen;Quantitative Reconstruction;Paleoclimate;Ebinur Lake;Xinjiang

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 绪 论	1
1.1 论文的选题依据及科学意义	1
1.2 研究区概况	2
1.3 研究区研究现状	3
1.4 本次主要工作量	4
第二章 研究方法与实验室分析	5
2.1 野外表土花粉样品的采集	5
2.1.1 表土孢粉样品的采集	5
2.1.2 剖面孢粉样品的采集	6
2.1.3 植被测定	6
2.2 实验室分析	6
2.2.1 孢粉实验室处理	6
2.2.2 孢粉显微镜下鉴定统计	7
2.2.3 孢粉数据整理	7
2.3 粒度分析	8
2.3.1 实验分析过程	8
2.3.2 分析结果	8
2.4 测年数据分析	9
第三章 表土孢粉分析与表土孢粉取样点气象数据重建	10
3.1 表土孢粉分析	10
3.2 表土孢粉组合带的划分及组合特征	11
3.2.1 艾比湖保护区表土孢粉和植被样带	11
3.2.2 艾比湖南岸表土孢粉和植被样带	14
3.2.3 温泉—孟克沟表土孢粉和植被样带	14
3.2.4 博尔塔拉河表土孢粉和植被样带	17
3.2.5 博尔—夏尔西里表土孢粉和植被样带	19
3.3 表土孢粉分析结果讨论	21
3.4 气象数据分析	21
3.4.1 年平均气温 (°C) 分析	22
3.4.2 年降水量 (mm) 分析	24
3.4.3 各站点依据公式计算的值和观测值对比	24
3.5 表土孢粉取样点气象数据重建	25

第四章 艾比湖区中全新世以来古气候定量重建	29
4.1 DCCA 分析（典型除趋对应分析）	29
4.2 孢粉数据定量重建古气候常用方法	30
4.3 WAPLS 模型建立	31
第五章 艾比湖地区中全新世以来环境演变	35
5.1 剖面孢粉分析	37
5.2 艾比湖剖面组合带的划分及组合特征	37
5.3 艾比湖剖面古气候定量重建	39
5.3.1 艾比湖剖面古气候重建数值	39
5.3.2 艾比湖剖面古气候曲线	40
第六章 结论与讨论	41
6.1 结论	41
6.2 讨论	43
参考文献	45
致 谢	49
个人简介	50
攻读硕士学位期间发表的论文和科研成果	50

第一章 绪论

随着全球变化研究的不断深入,第四纪孢粉学研究已取得了长足的进步,特别是近些年来,孢粉-植被-气候关系研究已成为世界孢粉学界的热点之一。因此,重建古植被、古气候、古环境、预测未来环境变化已成为第四纪研究的热点。植被是自然界中对气候变化反应最灵敏的指示物,植被的状况可以在相当大的程度上反映气候的状况,有什么样的植物就会产生什么样的孢粉,因此,孢粉与气候之间也存在着统计学上某种相对稳定的数量关系。提取出这种关系就可以利用孢粉的数据直接恢复古气候,这种方法省略了植被这个中间环节,从而可以提高精确度,在实际工作中由于植被类型难以量化,对定量恢复古气候是不方便的,而孢粉记录和气候指标都很容易用数量来表示,它们之间较易建立起数量关系(孙湘君等,1996)。随着孢粉分析、鉴定和¹⁴C测年技术的改进以及数值分析方法的发展,第四纪孢粉学在近些年取得了长足的进步。近十余年来,随着人口增长、工业发展、植被破坏和环境恶化以及众所周知的全球气候变化研究的发展,孢粉学家也开始特别关注现代孢粉组合与植被及人类现代生存环境的关系,然而,由于孢粉的产量、传播、散布、搬运、沉积、保存等一系列问题的复杂性与多变性,使得孢粉与植被和气候的关系成为孢粉学理论上和应用中最基本也最困难的研究内容之一,世界各国学者都在以不同的方法和途径试图解决这一问题。

1.1 论文的选题依据及科学意义

定量重建古气候是全球变化(PAGES)研究的重要内容之一,并已成为一项当今全球变化研究中的前沿课题。自数理统计方法被引入古气候研究以来,利用多种数学方法来定量恢复古环境已成为第四纪孢粉学研究的一个重要内容。国外早在20世纪70年代就开始尝试用计算机处理这些数据,80年代开始出现了许多应用于孢粉研究的软件。在运用孢粉数据定量重建古气候方面,研究方法也在不断创新,并取得了一些突破,这主要取决于对现代表土层孢粉研究的广泛和深入。这些方法包括主成分分析法、聚类分析、降趋势对应分析法和多元回归分析法等定量模型,以及趋势面分析、转换函数、生物群区和联合指数等。通过对孢粉数据的研究,建立孢粉-古植被-气候序列,进而推测该地环境演化的动态过程,不仅可以深入研究影响环境演化的动力因子和各因子之间的动力学机制,还可进行更深层次的数据挖掘,建立合理且日趋完善的全球变化模型,为预测未来环境演化趋势提供可靠而有力的工具和手段(潘安定

等, 2008)。

1.2 研究区概况

新疆是中国最大的省区, 面积约 165 万平方公里。因它位于亚欧大陆腹地, 远离海洋, 加之青藏高原阻挡了来自印度洋的暖湿气流, 从而使这里的降水量很少且分配极不均匀 (多集中在山区), 使其成为中国西部干旱区的主要区域。盆地内年降水量为 10-100mm, 山区平均为 250-530mm; 而南疆年蒸发量为 1000-1550mm, 北疆为 1000-1200mm, 形成了典型的干旱和半干旱气候特点 (韩德林, 1993)。

艾比湖位于准噶尔盆地西南, 是这一区域的汇水中心。其北部是天山最北支阿拉套南坡, 南侧是北天山西段北坡, 流域面积 50621km²。20 世纪 50 年代前, 艾比湖有博尔塔拉河、精河、四棵树河、奎屯河等河流汇入, 面积约 1200km²。近代由于人为活动的加剧, 目前艾比湖仅受博尔塔拉河、精河和部分地下水补给, 面积变化于 500~600 km² 之间, 湖面海拔 195m。地处 82° 35' ~83° 11' E, 44° 44' ~45° 10' N 内 (阎顺, 1996)。艾比湖盆地气候干燥, 降水稀少。年均气温是 8.3℃, 年均降水量 90.9mm。西部阿拉山口是全国著名的风口, 全年 8 级以上大风达 165 天, 最大风速 55m/s, 多集中在 4-6 月。艾比湖盆地地处荒漠带, 南北两侧山麓发育砾质、石膏质荒漠土, 植被为梭梭荒漠、麻黄荒漠; 东部平原盐化土壤上发育琵琶柴荒漠; 沙漠中发育半固定梭梭荒漠; 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怪柳灌丛; 在河流下游新老河道、河叉等处则发育胡杨林、芦苇沼泽和低地草甸。

艾比湖属构造带上的断陷湖泊, 它与哈萨克斯坦境内的萨克斯湖、阿拉湖处于同一断陷带上。该陷落带呈北西-南东走向, 控制着一系列湖泊的延伸方向。各湖之间, 由于后期构造运动而彼此隔离, 处于不同海拔位置。艾比湖盆地在第四纪曾持续下陷, 而周围山体上升。据钻孔资料证实, 至少有 200m 以上的沉积层属于中更新世以后的沉积, 由冲洪积物和湖相碎屑物质构成。现艾比湖湖底地形平坦, 坡度在 0.5% 以下, 最大湖深 2.8m, 平均 1.4m, 储水量约 7x10⁸-7.5x10⁸m³。湖泊属盐湖, 矿化度高达 80~120g / L, 属硫酸钠亚型水, 湖水 PH 值 8.4~8.9, 属弱碱性水 (阎顺, 1996)。整个水体的矿化度、比重、PH 值及主要化学成分无很大变化, 仅湖泊西南部因受河水补给影响, 矿化度较低。湖泊西北和东南边缘有芒硝沉积, 湖东有较大面积的石盐沉积, 其余位置主要为含盐黏土和沙质黏土沉积 (郑喜玉等, 1995)。

1.3 研究区研究现状

全新世气候特征的研究对人们普遍关心的未来气候变化预测具有重要意义,因此,全新世气候研究近年受到地学界的极大关注。而内陆湖泊对气候、环境的变化反应敏感,其形成与演化完整地记录了自然环境的变迁过程(Håkanson L 等, 1983; 陈发虎等, 2006; 孙千里等, 2006; 薛积彬等, 2008)。湖泊沉积物的孢粉组合可以直接反映湖区的植物群落面貌和植被类型,因而成为一项重要的古气候研究内容(许清海等, 2004; 喻春霞等, 2008; 肖霞云等, 2007)。根据现代表土孢粉组合与气候参数间的数理统计关系,可以定量重建地质时期古温度、古降水的演化历史(Imbrie J D 等, 1971; Bartlein P J 等, 1984; Guiot J, 1987)。因此依据花粉资料定量重建的古气候参数以其直接性和可靠性,在全球气候变化研究中具有不可替代的作用。

艾比湖为新疆干旱区封闭湖泊,其沉积物保存有清楚的古气候信息(吴敬禄等, 1996)。来自非洲(Kröpelin 等, 2008)、亚洲(Zhang 等., 2009)、欧洲(Jiménez-Moreno & Anderson, 2012)和美洲(Bamonte & Mancinio, 2011)等地区全新世以来的孢粉数据表明气候因素在湿地植被演变中起着重要作用。随着新疆地区第四纪环境演变研究的长足进展,在新疆艾比湖地区环境演变的研究也取得了重要进展。艾比湖大约自 3.6Ma 以来,伴随着青藏高原快速隆升发生的哈密运动,该区沉积环境由半深湖和浅湖演变为滨湖和水下三角洲,研究区干旱化状况加剧(张金起等, 2009);艾比湖地区进入全新世以来经历了温凉偏干、温湿为主和温干的气候变化过程,而且艾比湖保存有全新世 3 个不同时期的高湖面遗迹(吴敬禄, 1996);艾比湖全新世早期气候三次不稳定性记录在其他地区也存在(吴敬禄, 2003),尤其是日历年 8.2KaBP 的降温事件在青藏高原以及其他地区包括东部地区都有报道(Thompson L G 等, 1997),北大西洋深海记录、格陵兰冰芯、欧洲湖泊记录及其山地树线、树轮宽度变化等(Bond G 等, 1997; Alley R B 等, 1997)都记录了这一事件的存在,表明这一降温事件在北半球具有其普遍性。但相关事件在艾比湖地区表现为冷湿,而不是冷干,这一特征与欧洲湖泊最近研究结果一致(Magny M 等, 2001; Von Grafenstein U 等, 1992);晚全新世以来,艾比湖的沉积环境总体是比较稳定的,但由于气候波动引起的湖水量变化,使艾比湖的水位几度发生变化(阎顺, 2003);近 600 年来,许多地区发生的小冰期气候在艾比湖沉积物中也有记录,表现为湖水水位下降,盐度增大,水生生物减少,反映了较为干冷的小冰期气候特征(谢宏琴等, 2005);近 300 年以来, Ash 剖面的粒度分维值反映了博尔塔拉河向艾比湖输送碎屑物的能力由强变弱的变化过程(柏春广等, 2002),而且此时艾比湖水位下降,湖水盐度增加,水生植物减少(苗壮等, 2003)。而郑卓等(2006)和罗传秀等(2008)在新疆地区进行了较大尺度表

土孢粉与植被和气候关系研究, 研究结果表明在中国新疆地区大部分表土花粉属种的地理空间分布与含量与相应植物的分布区域基本一致, 藜科、蒿属、麻黄属及木本植物云杉属、桦木属等花粉普遍呈超代表性, 桤柳属花粉呈低代表性。干旱区主要草灌木表土花粉数据的聚类分析结果可以基本反映本区植物群落的主要生态组合类型。主成分分析进一步表明该区草本和灌木花粉分布主要受水文和湿度等因素控制。最近杨振京等(2011)在新疆天山南坡的表土花粉初步研究亦获得初步成果, 这无疑为进一步的深入研究创造了条件和打下了良好的基础。表土孢粉组合的研究是利用地层中孢粉组合恢复古地理、古植被、古气候、划分地层时代的基本依据, 由于天山南北气候和植被的差异形成不同植被带的表土花粉特征更有助于在环境恢复中反映地层中的花粉特征, 解决新疆地层中, 尤其是全新世以来的花粉的合理解释问题。因此以表土孢粉组合特征恢复古植被的模型去反映剖面所揭示的古环境变化, 能够在艾比湖地区恢复古环境的过程当中取得更好、更准确的结果。

本研究将通过孢粉分析、结合其它环境代用指标分析定量重建中全新世以来新疆天山西北部艾比湖地区环境演变序列, 探讨气候的突变事件与全球变化的响应; 即以艾比湖地区表土孢粉资料, 结合研究区内 18 个气象站 1971-2000 年共 30 年的气象资料, 应用 Wapls 模型建立了孢粉-气候数量关系, 并在艾比湖地区选取一处典型剖面, 进行较高分辨率的孢粉分析, 应用建立的孢粉-气候关系模型求得了艾比湖地区中全新世以来气候变化的数值, 定量地探讨了这一时期艾比湖地区气候变化的规律。并通过对比其他自然沉积剖面的孢粉分析结果, 揭示人类活动对环境变化的影响机制和尺度。

1.4 本次主要工作量

本项研究是导师杨振京研究员国家自然科学基金项目“新疆天山中段晚全新世以来气候与植被变化的孢粉学研究”(40972212)的主要内容之一, 通过中科院创新重大项目课题“干旱区生物多样性变化(KZCX1-10-05)”, 国家自然科学基金重点项目(中国西部环境和生态科学研究计划)“西部干旱区植被演变研究”(90102009), 国家博士后科学基金“新疆天山样带表土花粉的定量生物群区化”(2003033253), 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目“新疆中部近 2000 年的环境演变研究”(Sk07009)的工作积累, 在大量研究与学习前人资料的基础上, 分别于 2010 年 8 月-9 月, 2011 年 7 月-8 月近三个月的野外实地调查、取样, 取得表土孢粉样品 214 个, 剖面 8 处。在研究区内选择的表土花粉和植被调查路线为天山西部的艾比湖桦树林保护区, 艾比湖南岸, 温泉—孟克沟, 博尔塔拉河, 博乐—夏尔西里, 以及天山北部阿尔泰地区的乌伦古湖, 北屯, 红山嘴, 喀纳斯, 额尔齐斯河。

第二章 研究方法与实验室分析

依据孢粉学野外工作规则(王开发等, 1983; 王开发等, 1988; 徐馨等, 1992), 在研究区内选择的表土花粉和植被调查路线为天山西部的艾比湖桦树林保护区, 艾比湖南岸, 温泉—孟克沟, 博尔塔拉河, 博乐—夏尔西里, 以及天山北部阿尔泰地区的乌伦古湖, 北屯, 红山嘴, 喀纳斯, 额尔齐斯河, 采样范围自 $44^{\circ} 32' 43.9''$ N 至 $48^{\circ} 40' 41''$ N, $79^{\circ} 53' 13.8''$ E 至 $88^{\circ} 58' 58.3''$ E。植被类型主要为荒漠带、温性草原、高山草原带、亚高山灌丛带、高山草甸。

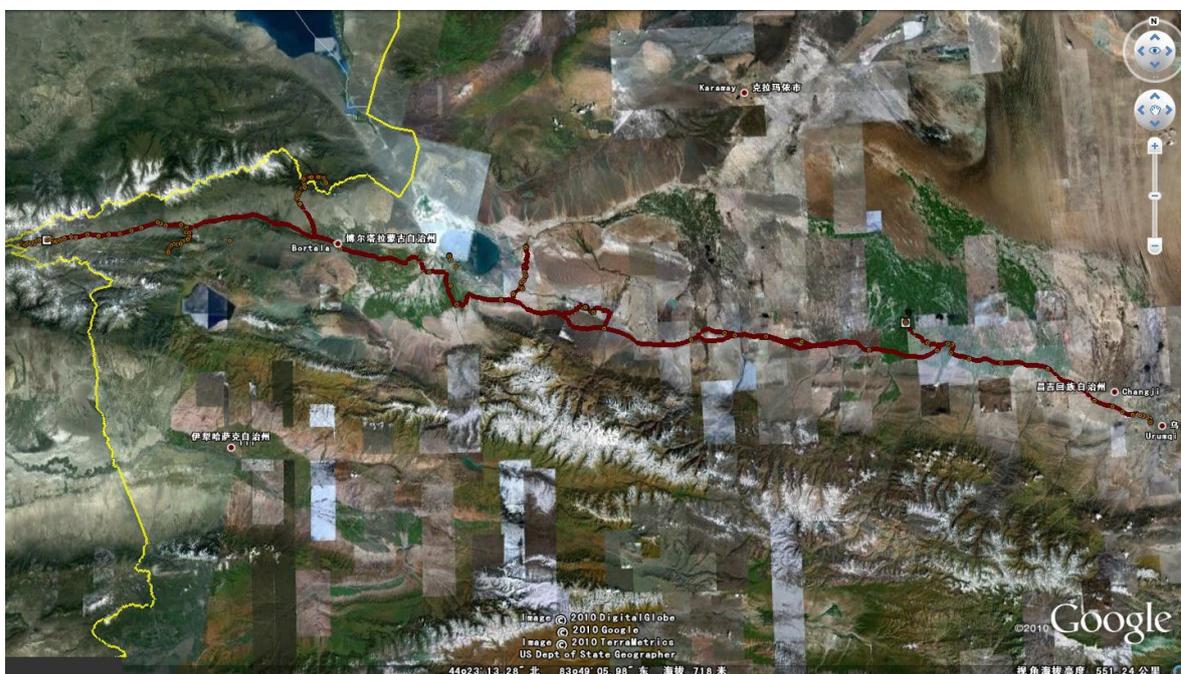


图 2-1: 艾比湖地区表土样品取样路线与取样点位置

Fig.2-1: The Ebinur Lake area surface soil samples sampling route and location

2.1 野外表土花粉样品的采集

2.1.1 表土孢粉样品的采集

山区海拔垂直高度 100m 左右, 平原地区水平距离 20km 左右。表土样品的采集与采样点周围植被的调查同时进行。表土样品主要采集林下表层土样和苔藓样, 共采集了 214 块表土孢粉样品。

(1) 林下表土样品采集: 采集林下表土层的土样, 每个采样点由 2~3 个样方组成, 样方为 $10 \times 10\text{m}^2$, 样品来源于样方不同部分的 5 块土样混合而成。

(2) 苔藓样品采集：苔藓象一个天然的花粉收集器，能吸附空气和水中降落下来的花粉（孙湘君，1987），一般根据采样点苔藓发育情况按 $5 \times 5 \text{cm}^2$ ， $10 \times 10 \text{cm}^2$ 或者 $20 \times 20 \text{cm}^2$ 苔藓面积，在不同的方位采集 5 块苔藓样品，将其混合而成一个组合样品。

2.1.2 剖面孢粉样品的采集

首先清理好剖面，将剖面表层刮掉 2~5cm 深，以达原生层位，保持剖面新鲜和未受现代花粉的影响，如有虫孔、龟裂和大缝隙也应除去，因这些孔隙受风、雨作用，易把现代孢粉填充进去。其次，采样最好是从剖面底部向上依次进行。采样间距应根据实际情况，如考虑文化层的分层、延续时间、堆积厚度、堆积物的岩性岩相变化、沉积速率等。原则上每一堆积层至少采集 1~2 个样品。采样量，粘土、亚粘土、亚沙土采 100g 左右，砂、沙砾采 150g 左右，泥炭采 30g 左右。第三、每采完一个样品，采样工具要擦干净，要防止前一个样品混入后一个样品中。第四、采样时动作要迅速，及时装进塑料袋并封口，以免飞进现代花粉。并用油笔在塑料袋上记录剖面名称、样号、采样深度、文化类型、采样日期、采样者等信息。最后采样剖面要照相、绘图，并对剖面进行描述。图中应表示出层序、岩性、厚度、文化性质等，标明采样点和采样号码。

2.1.3 植被测定

采集表土孢粉样品的同时，在取样点周围 10~20m 范围内做植被测定。具体方法是调查取样点周围植物群落中的植物种类及主要植物的丰度。植物丰度用估测的盖度（投影盖度）表示（童国榜等，1996），首先估测乔木及草本、灌木各自的总盖度，然后分别统计各属种的盖度，其计算方法与孢粉百分数的算法一致。

2.2 实验室分析

实验室分析是依据有关专著和文献的操作规程（王开发等，1983；1988；P·D 摩尔等，1987；徐馨等，1992；黄凤宝，1980；杜乃秋等，1990）进行的定量分析。

2.2.1 孢粉实验室处理

①称取孢粉样品 20-50g（泥质样品 20g、砂质样品 50g），置于 1000ml 的烧杯中，用量筒加体积比为 1:1 的盐酸去钙。

②用移液管滴入 2 滴已制备好的外加石松溶液到烧杯样品中（用于测定孢粉浓度）。

③加清水洗涤，每次换水间隔时间 ≥ 8 小时，洗至中性（PH=7）。

④用橡皮管吸去上清液，再加入 10%NaOH 溶液 150 毫升，加热至沸，并用玻璃棒不断搅拌，煮沸 3-5 分钟。

⑤冷却后加清水洗涤，每次换水间隔时间 ≥ 8 小时，洗至中性。

⑥用橡皮管吸去上清液，将样品移至离心杯中离心除去全部水体，离心 15 分钟（转速 2,500 转/分）。

⑦加入重液（比重 2.1），搅拌均匀，然后离心 25 分钟（转速 2,500 转/分），再用吸管吸取离心杯壁及上部的重液，放进小烧杯（200ml）内，如此操作 3 次。

⑧在小烧杯中加入 3 倍含 0.5%冰醋酸水溶液稀释，静置 24 小时后，吸去上面的液体，剩下底部少量液体，再倒进试管（或指形管）中离心，反复冲洗、离心 2~3 次，最后加入少许甘油，以备制片镜下鉴定统计。

2.2.2 孢粉显微镜下鉴定统计

孢粉的鉴定在 Olympus 生物显微镜下进行。将试管（或指形管）中的样品与甘油用玻璃棒搅拌均匀后，蘸少许于载玻片上，再盖上 $22 \times 22 \text{mm}^2$ 的盖玻片后进行镜下鉴定，放大倍数选用 250 倍-300 倍，化石微结构观察用 600 倍，油浸镜用 1 000 倍以上；每一号样品最少观察 6 个活动片以上，统计的孢粉数至少在 400 粒以上，孢粉个体少的样品尽量统计到 100 粒以上，一般都在 400 粒以上，同时统计外加石松孢子数，以进行定量分析。孢粉鉴定依据孢粉学和孢粉形态鉴定方面的专著，多数到属少数到科，对藻类也予以考虑。

2.2.3 孢粉数据整理

将孢粉镜下鉴定统计结果输入计算机，形成原始数据，然后进行孢粉百分比计算和孢粉浓度计算。

(1) 百分比计算公式为：

$$PA(I, J) = \frac{P(I, J)}{A(I)} \times 100\%$$

I 为样品顺序号； J 为鉴定孢粉类型顺序号； $PA(I, J)$ 为第 I 号样品中第 J 种类型孢粉占第 I 号样品中陆生孢粉总数的百分数； $P(I, J)$ 为第 I 号样品中第 J 种陆生孢粉总数； $A(I)$ 为第 I 号样品中陆生孢粉总数。

(2) 孢粉浓度计算：孢粉浓度指单位体积或重量的沉积物中所含的孢粉粒数。计算公式为：

$$AC(I, J)(\text{重量浓度}) = \frac{P(I, J) \times L(I)}{S(I) \times G(I)}$$

$$AC(I, J)(\text{体积浓度}) = \frac{P(I, J) \times L(I)}{S(I) \times V(I)}$$

$AC(I, J)$ 为孢粉浓度, 单位是粒/克或粒/ cm^3 ; $L(I)$ 为每个样品中外加石松孢子数; $S(I)$ 为统计中记下的外加石松孢子数; $G(I)$ 为处理的每个样品的重量; $V(I)$ 未处理的每个样品的体积。

2.3 粒度分析

在沉积物粒度的各种参数中, 粒度平均值是沉积物最主要的粒度特征参数之一, 由于湖泊沉积环境中, 湖水物理能量是控制沉积物粒度分布的主要因素, 细粒和粗粒沉积物分别代表了湖水物理能量降低和增强的阶段, 通常是分别代表了湖泊的高水位时期及低水位时期(陈敬安等, 2000; 柏春广等, 2002)。或者说, 在气候干旱期, 湖水退却, 采样点距岸边的距离较近, 粗颗粒物易于到达, 因而在该位置沉积的颗粒较粗, 反之在气候湿润期, 湖泊扩张, 采样点距岸边的距离较远, 粗颗粒物难以到达, 因而在该位置沉积的颗粒较细(钱亦兵等, 2000; 赵强等, 2003)。

取自艾比湖的剖面进行了粒度分析, 整个剖面取样间距 2cm, 共取粒度样品 85 件。采用英国马尔文公司生产的 Mastersize2000 型激光粒度仪进行测试、分析。

样品按常规方法进行预处理, 测试结果利用已开发的粒度数据分析软件进行处理, 计算样品的平均值、标准差、砂含量以及粘土含量等参数, 并绘制频率曲线、概率累积曲线等。

2.3.1 实验分析过程

取出样品 3-5g 放入烧杯容器中, 注入 10ml 浓度为 2:1 的双氧水溶液(双氧水: 水体积比 1:2), 对样品进行加热, 注入蒸馏水以防烧干, 待溶液中不出现小气泡时注入 10ml 浓度为 2:1 的盐酸溶液(盐酸: 水体积比 1:2), 注入蒸馏水以防烧干, 待溶液沸腾时取下, 烧杯降温后。注入 50ml 左右的蒸馏水, 静置 12h, 抽取上部清液, 剩余 20ml 左右, 注意不要抽走沉淀物, 然后注入 10ml (36g/1000ml) 的偏磷酸钠分散剂, 搅拌均匀, 把烧杯置于超声波振荡仪中振荡十分钟左右, 功率 50%, 便可以进行测试。

将样品按深度进行排列, 根据各参数及有关曲线形态变化规律划分出不同的组段。艾比湖剖面岩性总体以粘土、粗粉砂为主, 粘土含量上半部分在 20%左右, 下半部分达到 30%左右, 砂含量一般在 10%左右。沉积环境多变。

2.3.2 分析结果

第一组: 01-02 号样品, 2-4cm。该组沉积物粒径平均值 6.5Φ , 以粉砂为主, 约 88%, 砂含量 11.9%, 粘土约 27.9%, 标准差 2.1 左右, 尖度 2.4, 分选一般。频率曲

线以双峰为主，正偏态，概率累积曲线以二段、三段型为主。

第二组：03-25 号样品，4-50cm。该组沉积物粒径平均值 6.3Φ ，以粉砂为主，约 86%，砂含量 13.9%，粘土约 23.3%，标准差 2.1 左右，尖度 2.3，分选一般。频率曲线以单峰、双峰为主，正偏态，概率累积曲线以二段、三段型为主，部分样品同时含有粗砂、极粗砂组分。

第三组：26-39 号样品，50-78cm。该组沉积物粒径平均值 7.2Φ ，以粉砂为主，约 94%，砂含量 5.7%，粘土约 36.5%，标准差 1.9 左右，尖度 2.3，分选一般。频率曲线以单峰为主，正偏态，概率累积曲线以粗二段、粗三段型为主，主体粒径在 7.2Φ

第四组：40-44 号样品，78-88cm。该组沉积物粒径平均值 6.7Φ ，以粉砂为主，约 89%，砂含量 10.8%，粘土约 29.8%，标准差 2.1 左右，尖度 2.1，分选差。频率曲线以双峰为主，正偏态，概率累积曲线以二段、三段型为主。

第五组：45-52 号样品，88-104cm。该组沉积物粒径平均值 6.7Φ ，以粉砂为主，约 90%，砂含量 9.8%，粘土约 31%，标准差 2.11 左右，尖度 2.08，分选差。频率曲线以双峰为主，正偏态，概率累积曲线以二段型为主、

第六组：53-73 号样品，104-146cm。该组沉积物粒径平均值 6.5Φ ，以粉砂为主，约 86%，砂含量 13.7%，粘土约 28.2%，标准差 2.2 左右，尖度 2.0，分选差。频率曲线以双峰为主，正偏态，概率累积曲线以二段型为主。

第七组：74-85 号样品，146-170cm，该组沉积物粒径波动较大，粒径平均值 6.9Φ ，以粘土、粗粉砂为主，约 90%，砂含量 8.6%，粘土约 36.3%，标准差 2.1 左右，尖度 2.1，分选差。频率曲线以双峰为主，正偏态，概率累积曲线以二段、三段型为主，部分样品含有细砂、中砂组分。

2.4 测年数据分析

测年样品由北京大学考古文博学院科技考古与文物保护实验室完成，采用加速质谱(AMS) ^{14}C 测试。在剖面底部取样品深 165~170cm 测定年代为 $4679\pm 30\text{ a B.P.}$ ，105~110cm 为 $2880\pm 60\text{ a B.P.}$ ，20~25 测定年代为 $790\pm 25\text{ a B.P.}$ ；考虑到剖面取样处表层剥蚀不明显，认为剖面顶部为现代沉积，进而对剖面年代进行线性回归，从而得出艾比湖剖面的年代序列。

封闭湖泊的“碳库效应”一直是学术界的难题之一。本文仅采用沉积物样品进行(AMS) ^{14}C 测年，可能难以精确评价湖泊的“碳库效应”，而且碳库年龄是不断变化的。因此，单一的测年手段可能会影响测年结果的准确性。

第三章 表土孢粉分析与表土孢粉取样点气象数据重建

3.1 表土孢粉分析

214 个表土孢粉样品在镜下共统计鉴定孢粉 108923 粒, 平均每个样品约 509 粒, 这些孢粉分属 138 个科属植物类型, 均为新疆地区的现生植物, 具体成分如下:

乔木植物花粉主要有 18 种: 柏科 (Cupressaceae)、云杉属 (*Picea*)、冷杉属 (*Abies*)、松属 (*Pinus*)、落叶松属 (*Larix*)、铁杉属 (*Tsuga*)、桦属 (*Betula*)、杉科 (Taxodiaceae)、枫杨属 (*Pterocarya*)、鹅耳枥属 (*Carpinus*)、桤木属 (*Alnus*)、槭树属 (*Acer*)、杨属 (*Populus*)、胡桃属 (*Juglans*)、栎属 (*Quercus*)、栗属 (*Castanea*)、桑科 (*Moraceae*)、榆属 (*Ulmus*);

灌木植物花粉有 24 种: 麻黄属 (*Ephedra*)、柳属 (*Salix*)、榛属 (*Corylus*)、怪柳科 (Tamaricaceae)、蒺藜科 (Zygophyllaceae)、白刺属 (*Nitraria*)、忍冬科 (Caprifoliaceae)、木犀科 (Oleaceae)、芸香科 (Rutaceae)、胡颓子科 (Elaeagnaceae)、瑞香科 (Thymelaeaceae)、鼠李科 (Rhamnaceae)、锦葵科 (Malvaceae)、水柏枝属 (*Myricaria*)、骆驼蓬属 (*Peganum*)、骆驼刺属 (*Alhagi Gagnebin*)、驼蹄瓣属 (*Zygophyllum*)、绣线菊属 (*Spiraea*)、夹竹桃科 (Apocynaceae)、粉花绣线菊 (*Spiraea japonica*)、接骨木属 (*Sambucus*)、地榆属 (*Sanguisorba*)、小檗属 (*Berberis*)、葡萄属 (*Vitis*);

草本植物花粉主要有 74 种: 禾本科 (Gramineae)、藜科 (Chenopodiaceae)、菊科 (Compositae)、蒿属 (*Artemisia*)、豆科 (Leguminosae)、毛茛科 (Ranunculaceae)、唐松草 (*Thalictrum*)、蓼科 (Polygonaceae)、茄科 (Solanaceae)、大戟科 (Euphorbiaceae)、蔷薇科 (Rosaceae)、旋花科 (Convolvulaceae)、茜草科 (Rubiaceae)、唇形科 (Labiatae)、伞形科 (Umbelliferae)、龙胆科 (Gentianaceae)、兰雪科 (Plumbaginaceae)、律草属 (*Humulus*)、石竹科 (Caryophyllaceae)、百合科 (Liliaceae)、牻牛儿苗科 (Geraniaceae)、川续断科 (Dipsacaceae)、十字花科 (Cruciferae)、虎耳草科 (Saxifragaceae)、莎草科 (Cyperaceae)、香蒲属 (*Typha*)、眼子菜 (*Potamogeton*)、苍耳属 (*Xanthium*)、骆驼刺属 (*Alhagi*)、蓝刺头属 (*Echinops L.*)、紫菀属 (*Aster*)、蒲公英属 (*Taraxacum*)、菊属 (*Chrysanthemum*)、酸模属 (*Rumex*)、蓼属 (*Polygonum*)、蝶型花亚科 (Faboideae)、荞麦属 (*Fagopyrum*)、山黧豆属 (*Lathyrus*)、荨麻科 (Urticaceae)、车前科 (Plantaginaceae)、委陵菜属 (*Potentilla*)、扭藿香属 (*Lophanthus*)、鹿蹄

草科(Pyrolaceae)、夏枯草属(*Prunella*)、大麻属(*Cannabis*)、老鹳草(*Geranium*)、罗布麻属(*Apocynum*)、罂粟科(Papaveraceae)、列当属(*Orobancha*)、大麻科(Cannabidaceae)、桔梗科(Campanulaceae)、水晶兰(*Monotropa uniflora* L)、千屈菜属(*Lythrum*)、黑三棱属(*Sparganium*)、亚麻科(Linaceae)、柳叶菜科(Onagraceae)、花苾科(Polemoniaceae)、败酱科(Valerianaceae)、红毛七属(*Caulophyllum*)、博落回属(*Macleaya*)、梅花草属(*Parnassia*)、玄参科(Scrophulariaceae)、景天属(*Sedum*)、狐尾藻属(*Myriophyllum*)、堇菜属(*Viola*)、蚊子草属(*Filipendula*)、鲜卑花属(*Sibiraea*)、紫草科(Boraginaceae)、紫草属(*Lithospermum*)、独活属(*Heracleum*)、苕菜属(*Nymphoides*)、白花丹科(Plumbaginaceae)、马先蒿属(*Pedicularis*)、报春花科(Primulaceae)。

蕨类植物孢子主要有 22 种：石松(*Lycopodium*)、卷柏属(*Sellaginella*)、中华卷柏(*S. Sinensis*)、蕨属(*Pteridium*)、铁线蕨属(*Adiantum*)、阴地蕨属(*Botrychium*)、水龙骨科(Polypodiaceae)、三缝孢(*Triletes*)、紫萁属(*Osmunda*)、蹄盖蕨属(*Athyrium*)、鳞盖蕨属(*Microlepia*)、碗蕨科(Dennstaedtiaceae)、高山苔属(*Athalamia*)、卷柏属(*Sellaginella*)、水龙骨属(*Polypodiodes*)、瓦韦属(*Lepisorus*)、膜蕨科(Hymenophyllaceae)、珠蕨属(*Cryptogramma*)、沼泽蕨(*Thelypteris*)、光面单缝孢(*Laevgatomonoleti*)、苔藓植物(*Bryophyta*)、双星藻(*Zygenma*)。

3.2 表土孢粉组合带的划分及组合特征

表土孢粉分析表明，艾比湖地区孢粉植物种群的类型、主要组成成分和种群结构都依海拔高程和地理位置的不同而有规律的变化，孢粉组合基本反映了各植被带类型的特点，现依据表土孢粉分析结果将艾比湖附近地区各带的孢粉组合特征及反映的植物群落特征分述如下：

3.2.1 艾比湖保护区表土孢粉和植被样带

该孢粉组合中，根据其孢粉组合特征将其划分为四个孢粉组合带：

带 I：蒿属-藜科-禾本科孢粉组合带

本带包括 4 个孢粉样品，木本花粉含量为 17.2%，草本花粉含量为 82.7%，蕨类孢子含量为 0.1%，在木本花粉中以白刺属花粉(11.6%)为主，草本花粉中以蒿属含量最高(30.6%)，其次主要为藜科(30.3%)和少量禾本科(12.3%)等。可见本带中以草本花粉为主，其次为木本，草本中蒿属含量最高，藜科次之，表明该区气候较干

旱,是以蒿属、藜科为主的荒漠植被类型。现代植被调查,本区域为荒漠植被景观,植被稀疏,盖度低,平均约 20%;

带 II: 白刺-藜科-蒿属孢粉组合带

本带包括 2 个样品,该带木本花粉含量为 12.3%,较上一带减少,草本花粉含量为 87.6%,蕨类孢子含量为 0.1%,木本植物花粉以白刺属(6.1%)和怪柳科(2.4%)为主,草本植物花粉中以藜科(32.5%)为主,其次为蒿属(30%)和禾本科(10.5%)。该带仍以草本植物花粉为主,总体来看,本带表明该区气候干旱,仍为荒漠植被类型。现代植被调查,本区域草本盖度为 30%,灌木稀疏,为荒漠景观。

带 III: 藜科-蒿属-禾本科孢粉组合带

本带包括 5 个样品,该带木本植物花粉含量为 17.3%,草本花粉含量为 82.2%,仍占优势,蕨类孢子含量为 0.5%,其中木本植物花粉以桦属为主(10.2%),草本植物花粉以藜科为主(49.1%),其次为蒿属(20.1%)。该带仍以草本植物花粉为主,但种类增多,总体来看,本带表明该区气候较之前略好,为荒漠草原植被景观。现代植被调查,本区域木本盖度约 70%,为草原植被类型。

带 IV: 桦属-藜科-蒿属孢粉组合带

本带包括 4 个样品,该带木本植物花粉含量为 27.5%,较上带明显增加;草本花粉含量为 71%,仍占优势,蕨类孢子含量为 1.5%,其中木本植物花粉以桦属为主(21.2%),草本植物花粉以藜科为主(32.2%),其次为蒿属(19%)和禾本科(9%)。该带仍以草本植物花粉为主,但比例减小,总体来看,随着海拔的增高,本带处于该区气候最好阶段,为草原植被景观。现代植被调查,本区域植被盖度较高,地理位置处于艾比湖桦树林自然保护区内。

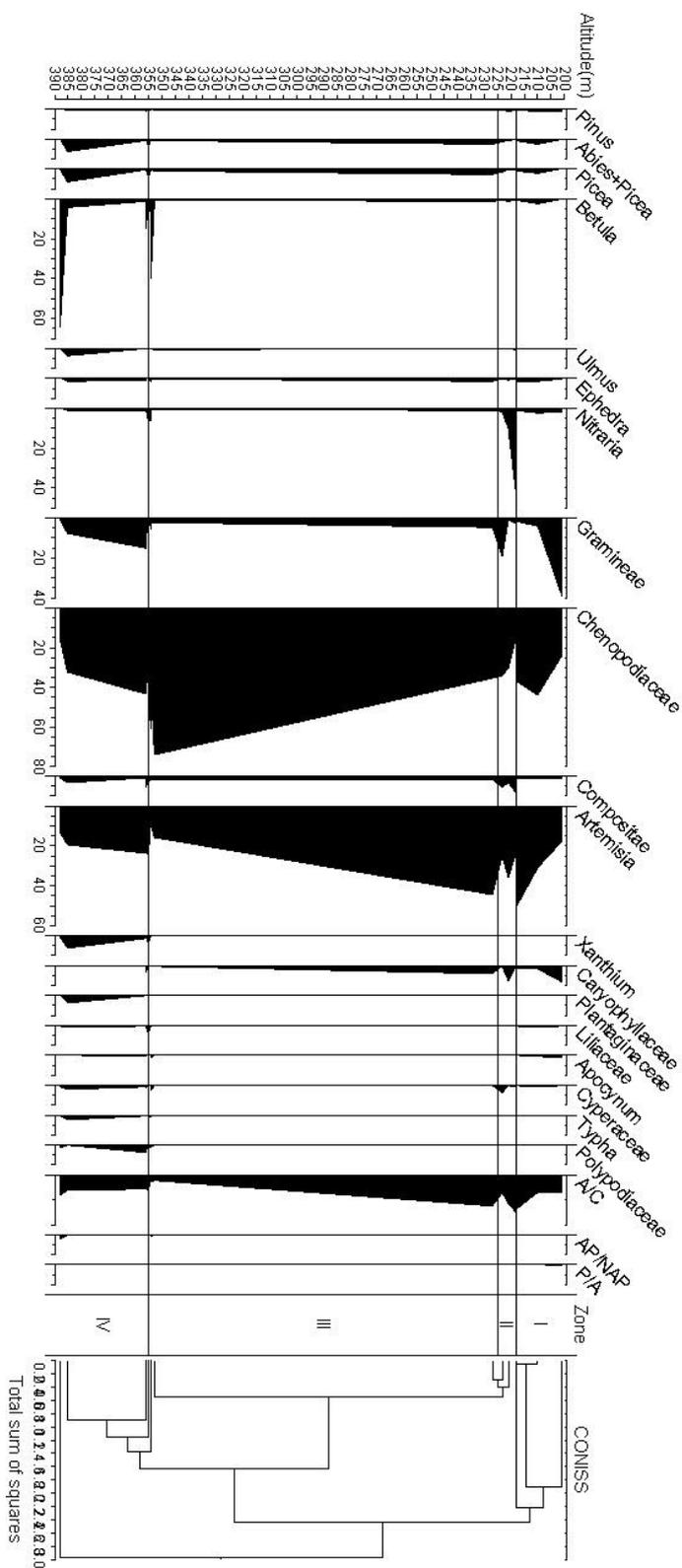


图 3-1 艾比湖保护区表土样品孢粉组合

Fig.3-1 The Ebinur Lake protected areas surface soil samples palynological assemblages

3.2.2 艾比湖南岸表土孢粉和植被样带

本带包括样品两个，采样点海拔均为 192m，样品中木本植物花粉占 4%，草本植物花粉占 95.9%，蕨类孢子含量为 0.1%，木本植物花粉中以桦属和松属为主，但含量均较低，草本植物花粉中藜科为 65%，占绝对优势，其次为蒿属（26.9%）。

该带孢粉组合反映的是荒漠植被景观，现代植被调查，该区植被盖度低，为荒漠植被景观。

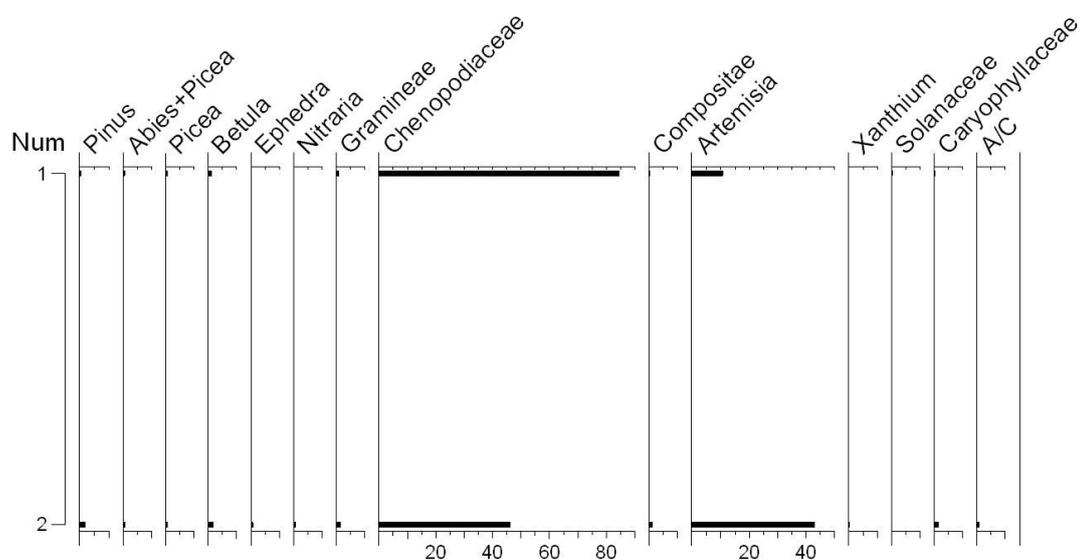


图 3-2 艾比湖南岸表土样品孢粉组合

Fig.3-2 The Ebinur Lake South Shore surface soil sample palynological assemblages

3.2.3 温泉—孟克沟表土孢粉和植被样带

带 I: 云杉-蒿属-藜科孢粉组合带

本带包括 5 个样品，孢粉组合中木本花粉含量为 9.7%，草本花粉含量为 85.9%，蕨类孢子含量为 4.4%，在木本花粉中以云杉为主（7%），草本花粉中以蒿属为主（47.6%），其次为藜科（20.9%）和禾本科（6%）。总体来看，本带以草本花粉为主，不过由于取样点海拔较高，云杉花粉含量较大，A/C（蒿属/藜科）在本带比值均为 1.5 以上，平均值为 2.2，并且有菊科、紫菀、水龙骨科和蹄盖蕨孢粉出现，故该组合反映了较冷湿的气候类型，为亚高山草甸植物群落。现代植被调查，本区域为亚高山草甸植被景观，人类干扰较多。

带 II: 云杉-蒿属孢粉组合样带

本带包括 5 个样品，孢粉组合中木本花粉占 13.5%，较上一带增加，草本花粉含量为 85.8，较上一带变化不大，仍占有优势，蕨类孢子含量为 0.7%，在木本植物花粉中以云杉为主（10.9%），草本花粉以蒿属为主（63.8%），其次为藜科（11.4%）；随着海拔的升高，云杉的含量逐渐增加，藜科花粉减少，以及 A/C 的增加，说明气候环境变的更为湿润寒冷，该孢粉组合反映了亚高山草甸景观。现代植被调查为亚高山禾草草甸。

带 III：云杉-蒿属-莎草科孢粉组合带

本带包括 4 个样品，孢粉组合中木本植物花粉占 14.3%，草本花粉含量占 83.9%，均较上一带变化不大，蕨类孢子占 1.8%，木本植物花粉中云杉属占 7.5%，草本花粉以蒿属（38.3%）、藜科（15.9%）、禾本科（12.8%）为主，还有莎草科 3.4%；随着海拔的继续升高，松属花粉增加，但是含量较小，认为是外源花粉，禾本科的增加可能是人类活动的干扰，故总的来说该带较上一带变化不大，亦反映的是亚高山草甸景观。现代植被调查为亚高山禾草草甸。

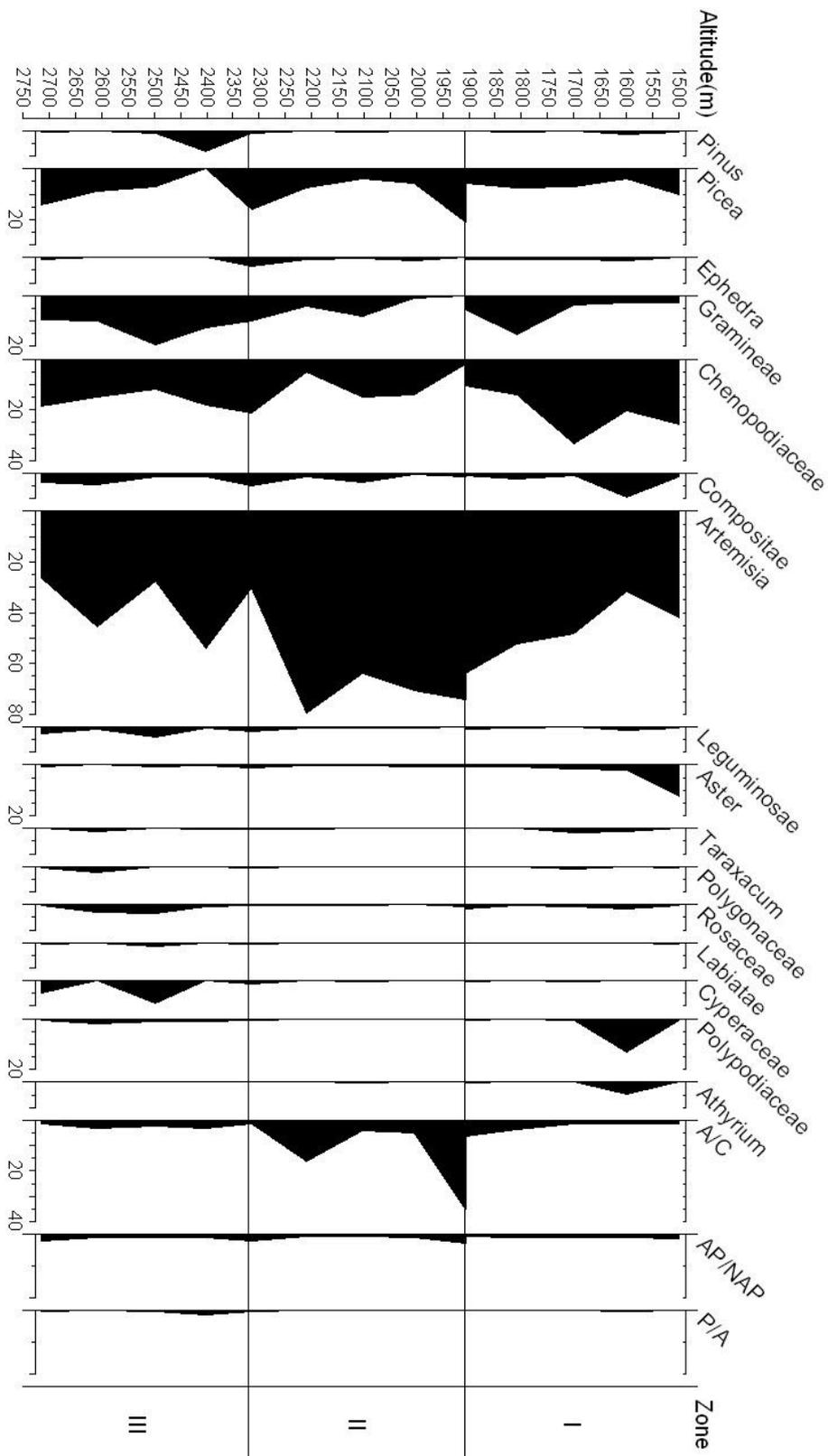


图 3-3 温泉—孟克沟表土样品孢粉组合

Fig.3-3 The Wenquan-Mengkegou surface soil sample palynological assemblages

3.2.4 博尔塔拉河表土孢粉和植被样带

带 I: 藜科-蒿属-禾本科孢粉组合带

该带包括 2 个样品, 孢粉组合中, 木本花粉占 11%, 草本花粉占 88.6%, 蕨类孢子占 0.4%, 木本花粉以云杉属为主, 但含量较低 (3.6%), 草本植物花粉中以藜科 (36.7%) 为主, 还有蒿属 (32.8%) 和禾本科 (11.3%), 该带总体来看反应的是较干旱的环境类型, 为荒漠草原植被景观。现代植被调查为荒漠草原植被景观, 植被盖度较低。

带 II: 云杉-藜科-蒿属孢粉组合带

该带包括 10 个样品, 该带中, 木本花粉占 9.5%, 草本花粉占 90.2%, 蕨类孢子占 0.3%, 随着海拔的增高, 云杉属花粉 (5.4%) 含量增加, 草本植物花粉中仍以藜科 (42.7%) 和蒿属为主 (29.2%), 该带反映了较为冷干的气候类型以及亚高山草甸植被类型。现代植被样方调查为灌丛草地。

带 III: 蒿属-藜科-石竹科孢粉组合带

该带包括 8 个样品, 孢粉组合中, 草本花粉占 91%, 其主要为蒿属 (20.7%)、藜科 (17.8%)、禾本科 (16.6%)、石竹科 (13.1%)、豆科 (4.4%) 等, 还有莎草科的出现 (2.5), 木本植物花粉占 7.8%, 云杉属和冷杉属共占 1.2%。随着海拔的继续升高, 该区域表现为较湿润的气候类型, 温度偏量, 反映了高山草甸植被景观。现代植被调查主要为锦鸡儿灌丛, 高山草甸植被类型。

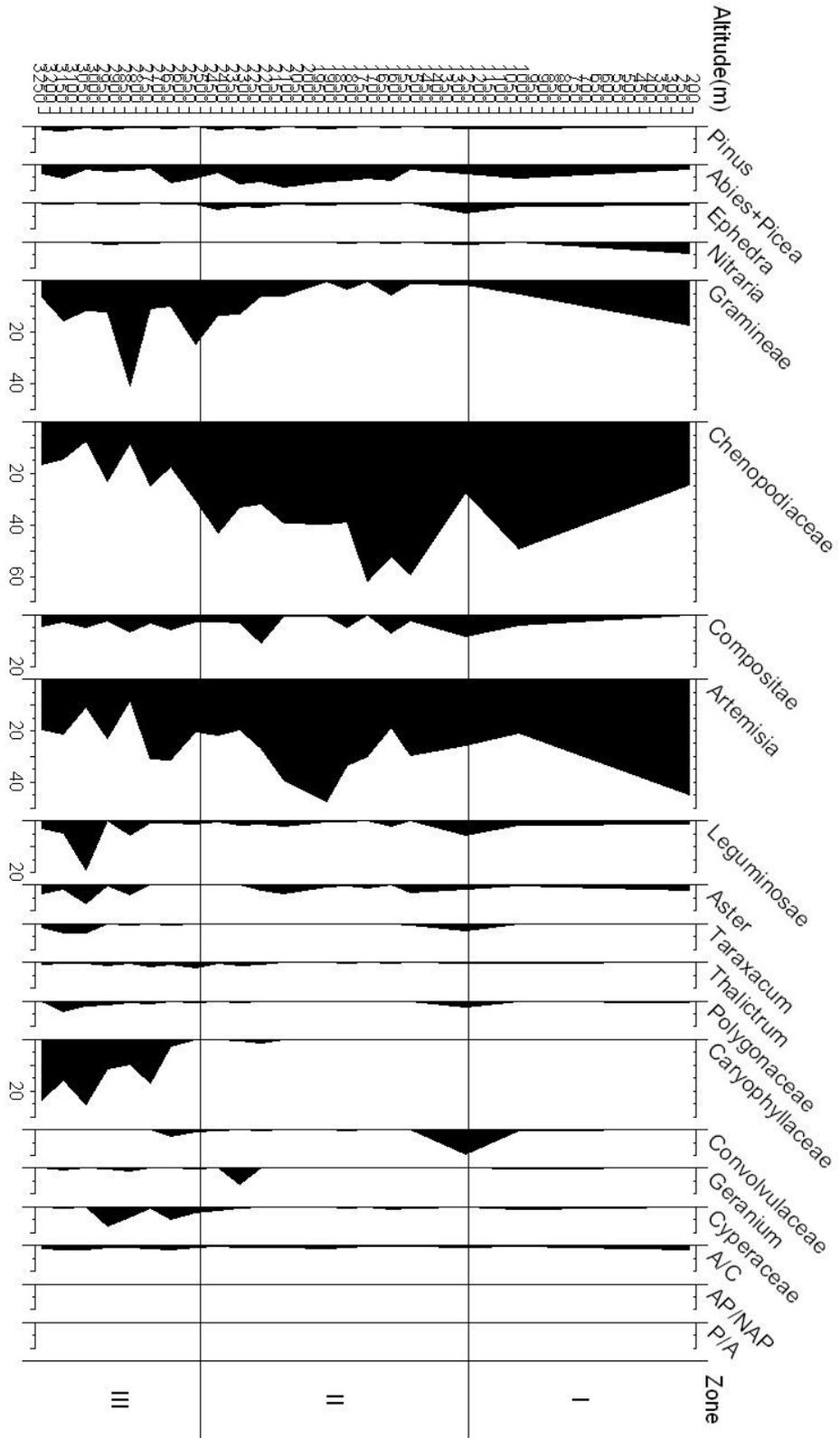


图 3-4 博尔塔拉河表土样品孢粉组合

Fig.3-4 The Boertala River surface soil sample palynological assemblages

3.2.5 博尔—夏尔西里表土孢粉和植被样带

带 I: 云杉-蒿属-藜科孢粉组合带

该带包括 5 个样品，孢粉组合中木本花粉占 19.8%，草本花粉含量为 79.5%，蕨类孢子为 0.67%，木本植物花粉中，主要为云杉属（15%），以及少量桦属，草本植物花粉中主要为蒿属（33.1%）、藜科（26%）、禾本科（6.5）；该带反映了较冷干的气候类型，所反映的植被类型为草地植被类型。现代植被调查为羊茅草地，草本盖度为 30%，蒿属具有超代表性。

带 II: 云杉-蒿属孢粉组合带

该带包括 12 个样品，孢粉组合中木本花粉占 18.5%，其中主要为云杉属（10.4%）和桦属（3.9%），木本植物花粉占 77.6%，主要为蒿属（35.6%）、藜科（15.3%）、禾本科（6.1%）、菊科（4.3%）、豆科和水龙骨科等，该带花粉类型较多，且含量较高，综合来看，反映了较温湿的气候条件，为草原植被类型。现代植被调查为亚高山草原植被景观，云杉属和蒿属具高代表性。

带 III: 云杉-蒿属-藜科孢粉组合带

该带包括 16 个样品，孢粉组合中木本花粉占 25.2%，较上一带增加，其中主要为云杉属花粉 16.7%，可见随着海拔的升高温度降低；草本植物花粉占 70.6%，其中主要为蒿属（26.2%）、藜科（18.2%）、禾本科（6.9%）、菊科（4.5%）、石竹科和莎草科等，可见，本带反应了较冷湿的气候类型，植被景观为亚高山草甸。现代植被调查为云杉林和灌木丛，云杉属有超代表性。

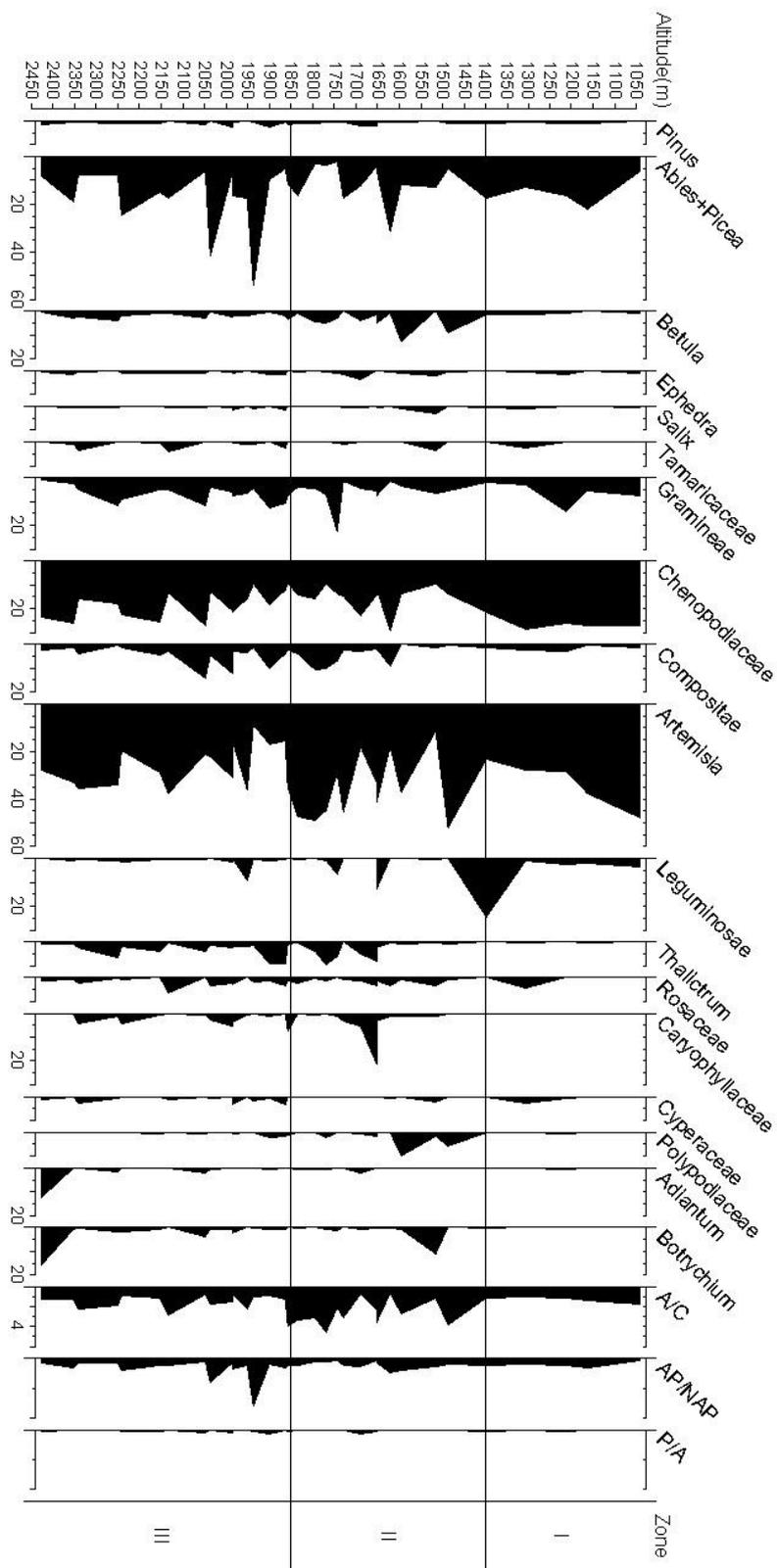


图 3-5 博乐—夏尔西里表土样品孢粉组合

Fig.3-5 The Boertala River-Xiaerxili surface soil sample palynological assemblages

3.3 表土孢粉分析结果讨论

比较表土孢粉组合和孢粉植物群与当地现代区域植被的特征,总的看来,孢粉植物群与现代植被分布之间没有大的差别,大体上是比较一致的,根据艾比湖地区表土孢粉分析结果,在艾比湖地区表土孢粉垂直尺度上,蒿属、藜科花粉的分布有一定的分布空间,本研究中,艾比湖地区蒿属、藜科的广泛分布高度为190-2000m之间,这种现象与二者花粉产量大、传播能力强有关;高于这个海拔,蒿属和藜科花粉的含量比例下降,转为针叶林或亚高山草甸、高山草甸植被景观。在艾比湖地区表土孢粉样品水平样带上,西部表土样带孢粉种类明显多于东部样带,在沟谷河流下游地区的孢粉种类多于上游地区,因此也说明在艾比湖地区风力和流水作用对孢粉的运移作用较明显。

出现一些差异,其原因可能是:①外来孢粉:凡未见出现在记录样方中的孢粉种类,都可以被看作是外来植物的孢粉(李文漪,1998)。但实际上几乎所有孢粉都有可能散布到群落以外的一定距离,而形成那里的外来孢粉,它们将和本地孢粉混合堆积在一起。从而使所有表土中的孢粉组合必定是本地和外来孢粉的混合组合。而且同一种植物的每粒孢粉可能是本地的,也可能是外来的,这是无法判别的。也就是说,表土孢粉组合,具有本地的和外来的双重性质。孢粉传播的自然条件,如风、流水和地形等,会对于本地的孢粉数量产生影响。如流水可把较高植被带的孢粉搬运到较低植被带内沉积下来,在博乐河、温泉—孟克沟地区,这种流水作用是明显而又广泛存在的;当外来孢粉的种属与本地植物不一致时,就可能产生差别。所以,在孢粉分析中,加强植物生态和植物区系方面的理解和认识可以弥补对孢粉与植物关系理解上的不足;②孢粉产量与统计量:有些种类的植物在植被中出现率较低,如果其花粉产量又低的话,则它们在表土孢粉谱中也很难出现,只有当统计到足够的数量时才有可能偶尔见到。前人以往提出的统计150粒乔木花粉,这对温带的森林植被是可取的,在亚热带地区,由于植物种类繁多,需做更大量统计,一般450粒乔木花粉是必要的,对此,姚祖驹提出用极大似然估值(The maximum likelihood estimate),来计算不同花粉组合类型所需统计的花粉数量(李文漪等,1993);③不同属种的植物花粉产量和保存能力不一样,导致孢粉组合与现代植被组合之间的差异;④植被带界线划定的主观性,植被带之间常常是逐步过度的,往往没有明显的分界线,植被带的界线,常常是人们根据一定范围内的植被整体特征而主观划分的,这种界线实际上是一个过渡带。

3.4 气象数据分析

本文对表土孢粉取样点附近的18个气象站点进行分析,以1971~2000年气候指

标的平均值为准，拟建立年平均气温、年降水量分别和纬度、经度、海拔高度之间的关系。本文运用 SPSS 多元线性回归分析和显著性检验，分别对年平均气温 (T) 和年降水量(P)进行分析。进行 SPSS 分析后结果和相关分析如下：

表 3-1 气象站数据资料
Tab3-1 Weather station data

气象站点	纬度	纬度 (X)	经度	经度 (Y)	海拔高度 (m)	年平均气温 (°C)	年降水量 (mm)
塔城	46°44'	46.75	83°00'	83	534.9	7.1	282.4
阿拉山口	45°11'	45.19	82°34'	82.58	336.1	8.9	103.1
托里	45°56'	45.95	83°36'	83.61	1077.8	5.3	233.1
克拉玛依	45°37'	45.63	84°51'	84.86	449.5	8.6	105.7
温泉	44°58'	44.98	81°01'	81.02	1357.8	3.9	231.7
精河	44°37'	44.63	82°54'	82.92	320.1	7.8	102
乌苏	44°26'	44.44	84°40'	84.68	478.7	8.1	165.8
石河子	44°19'	44.32	86°03'	86.05	442.9	7.4	206
伊宁	43°57'	43.97	81°20'	81.34	662.5	9	268.9
昭苏	43°09'	43.15	81°08'	81.14	1851	3.3	492.2
巴仑台	42°44'	42.75	86°18'	86.31	1739	6.4	216.4
巴音布鲁克	43°02'	43.03	84°09'	84.15	2458	-4.5	268.8
焉耆	42°05'	42.08	86°34'	86.58	1055.3	8.5	79.8
吐鲁番	42°56'	42.95	89°12'	89.2	34.5	14.4	15.6
哈巴河	48°03'	48.05	86°24'	86.41	532.6	4.9	184.8
吉木乃	47°26'	47.44	85°52'	85.88	984.1	4.2	202.8
福海	47°07'	47.12	87°28'	87.47	500.9	4.2	121.9
阿勒泰	47°44'	47.75	88°05'	88.08	735.3	4.5	191.3

T: 年平均气温 X: 纬度 Y: 经度 H: 海拔高度 P: 年降水量

3.4.1 年平均气温 (°C) 分析

$$\text{设 } T = a + a_1X + a_2Y + a_3H$$

$$P = a + a_1X + a_2Y + a_3H$$

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	56.573	18.332		3.086	.008
	纬度	-1.044	.240	-.513	-4.356	.001
	经度	.019	.177	.012	.109	.915
	海拔高度	-.006	.001	-.968	-7.956	.000

a. Dependent Variable: 年平均气温

图 3-6 温度三变量回归分析

Fig.3-6 The temperature three variables regression analysis

从上表中可以看出，经度的显著性大于 0.05，不显著，对年平均气温的影响不是很明显，为了更好的分析其他自变量对因变量的关系，所以将经度这一变量剔除出去，再分析纬度和海拔高度对年平均气温的影响。结果如下：

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	58.172	10.654		5.460	.000
	纬度	-1.043	.231	-.512	-4.506	.000
	海拔高度	-.006	.001	-.971	-8.541	.000

a. Dependent Variable: 年平均气温

图 3-7 温度双变量回归分析

Fig.3-7 Temperature bivariate regression analysis

数据表明：两个回归系数 B 的显著性水平 p 值=0.000 均小于 0.05，说明两个变量对因变量有显著的影响。得到的回归方程为 $T=58.172-1.043X-0.006H$ 。

T 公式表明，年平均气温与纬度和海拔高度有关，和经度没有特别大的关系，和纬度和海拔高度呈负相关，温度随着纬度和海拔高度的增加而降低。运用公式计算的哈巴河的年均气温为 5.0℃，观测值为 4.9℃，绝对误差为 0.1℃，其他各站点的预测值和观测值都拟合的较好，可见公式给出的计算结果是可靠的。

3.4.2 年降水量 (mm) 分析

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	1092.608	761.622		1.435	.173
	纬度	14.082	9.956	.250	1.414	.179
	海拔高度	.099	.030	.598	3.279	.005
	经度	-19.109	7.353	-.444	-2.599	.021

a. Dependent Variable: 年降水量

图 3-8 降水量三变量回归分析

Fig.3-8 The precipitation three variables regression analysis

从上表中可以看出，纬度的显著性大于 0.05，不显著，对年降水量的影响不是很明显，为了更好的分析其他自变量对因变量的关系，所以将纬度这一变量剔除出去，再分析经度和海拔高度对年降水量的影响。剔除变量后结果：

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	1697.765	650.756		2.609	.020
	海拔高度	.084	.029	.508	2.878	.011
	经度	-18.618	7.585	-.433	-2.455	.027

a. Dependent Variable: 年降水量

图 3-9 降水量双变量回归分析

Fig.3-9 Precipitation bivariate regression analysis

上表数据：两个回归系数 B 的显著性水平 p 值=0.000 均小于 0.05，说明两个变量对因变量有显著的影响。得到的回归方程： $P=1697.765-18.618Y+0.084H$ 。

公式表明：年降水量主要取决于经度和海拔高度的影响，和纬度没有什么关系，年降水量随着海拔高度的增加而增加，而随着经度和增加而减少，和经度呈负相关关系。运用公式计算出来的哈巴河的降水量为 170.88mm，观测值为 184.8mm，相差 14.08mm，其他各站点的预测值和观测值都拟合的较好，可见公式给出的计算结果是可靠的。

3.4.3 各站点依据公式计算的值和观测值对比

表 3-2 各气象站数据分析值和观测值比较
Tab3-2 To compare the weather station data analysis and observations

气象站点	年平均气温 (°C)	公式计算出的 年平均气温 (°C)	年降水量 (mm)	公式计算出的年降 水量 (mm)
塔城	7.1	6.27898	282.4	217.96569
阿拉山口	8.9	9.05111	103.1	184.2985
托里	5.3	3.98012	233.1	248.91223
克拉玛依	8.6	7.97881	105.7	158.17817
温泉	3.9	3.32021	231.7	312.5274
精河	7.8	9.73492	102	168.32821
乌苏	8.1	9.04828	165.8	147.75793
石河子	7.4	9.40743	206	116.33685
伊宁	9	8.40937	268.9	223.20028
昭苏	3.3	2.37499	492.2	333.40179
巴仑台	6.4	3.54134	216.4	217.86347
巴音布鲁克	-4.5	-0.95871	268.8	334.42284
焉耆	8.5	8.20743	79.8	135.43054
吐鲁番	14.4	13.26468	15.6	-3.67055
哈巴河	4.9	5.00121	184.8	170.88248
吉木乃	4.2	3.0116	202.8	217.2196
福海	4.2	6.17611	121.9	134.38582
阿勒泰	4.5	4.17213	191.3	154.85876

3.5 表土孢粉取样点气象数据重建

根据以上数据得到的年均温 (T) 回归方程 $T=58.172-1.043X-0.006H$ 和年均降水量 (P) 回归方程 $P=1697.765-18.618Y+0.084H$ 对艾比湖地区 214 个表土孢粉取样点进行年均温 (T) 和年均降水量 (P) 的重建, 得出结果如下表所示:

表 3-3 表土样点气象数据计算
Tab3-3 The surface soil samples meteorological data calculated

表土孢粉样点编 号	年均温 (°C)	年降水量 (mm)	表土孢粉样点 编号	年均温 (°C)	年降水量 (mm)
AB-1	10.27134	168.37394	HZSB-11	-2.33228	188.62808
AB-2	10.29405	165.94232	HZSB-12	-1.67385	179.18372
AB-3	10.24319	165.43142	HZSB-13	-0.98542	169.50554
AB-4	10.2419	164.82524	HZSB-14	-0.33142	160.34954
AB-5	10.21347	164.89106	HZSB-15	0.33116	151.76336
AB-6	10.23775	163.78088	HZSB-16	0.9786	143.30882
AB-7	10.16659	162.8387	HZSB-17	1.64847	135.05864

AB-8	9.56749	168.53186	HZSB-18	1.9529	131.68736
AB-9	9.56149	168.42968	HZSB-19	2.60505	124.59062
AB-10	9.54949	168.59768	HZSB-20	2.8492	122.46116
AB-11	9.56149	168.42968	HZSB-21	3.09806	119.64152
AB-12	9.55549	168.3275	HZSB-22	2.4832	128.51606
AB-13	9.54949	168.59768	HZSB-23	3.91406	108.96224
AB-14	9.39635	170.10278	HZSB-24	1.56963	141.82442
AB-15	9.37835	170.35478	HZSB-25	2.20563	133.29278
AN-1	10.25188	171.76406	HZSB-26	2.75163	125.83496
AN-2	10.25188	171.76406	HZSB-27	2.82963	125.3015
WM-1	-4.91141	419.35862	HZSB-28	2.25363	133.92404
WM-2	-4.27984	410.37062	HZSB-29	1.61006	143.26622
WM-3	-3.62584	401.21462	HZSB-30	2.30449	134.06258
WM-4	-3.06027	393.15062	HZSB-31	2.17092	137.38184
WM-5	-2.5427	385.75862	HZSB-32	2.95535	128.22146
WM-6	-1.92913	376.83644	HZSB-33	3.61406	120.23708
WM-7	-1.28713	367.47608	HZSB-34	3.8932	116.7818
WM-8	-0.69313	358.60154	HZSB-35	4.00305	116.00324
WM-9	-0.11713	350.16518	KNSB-1	4.12955	141.18836
WM-10	-0.11713	350.16518	KNSB-2	3.63912	146.97746
WM-11	0.45601	341.663	KNSB-3	3.08869	150.81386
WM-12	1.10401	332.21864	KNSB-4	2.48011	157.52696
WM-13	1.70401	323.44628	KNSB-5	1.86082	166.13132
WM-14	2.28915	314.7761	KNSB-6	1.23839	174.8855
BH-1	-8.07913	482.11298	KNSB-7a	0.59353	183.6215
BH-2	-7.47313	473.4428	KNSB-7b	0.59353	183.6215
BH-3	-6.83713	464.16644	KNSB-8	0.0251	191.61968
BH-4	-6.24313	455.2919	KNSB-9	0.47695	184.56368
BH-5	-5.62513	446.08136	KNSB-10	-0.17963	192.6935
BH-6	-5.06999	437.45882	KNSB-11	0.57065	182.35022
BH-7	-4.48799	428.19374	KNSB-12	0.05807	188.8364
BH-8	-3.80556	417.66866	KNSB-13	-0.74565	199.31822
BH-9	-3.18442	407.56358	KNSB-14	-1.66208	212.1884
BH-10	-2.56642	397.42214	KNSB-15	-2.18251	219.3284
BH-11	-1.99328	387.6167	KNSB-16	-1.59737	211.03058
BH-12	-1.34685	377.40944	KNSB-17	-0.9718	201.9404
BH-13	-0.79928	368.29418	KNSB-18	-1.60466	210.5084
BH-14	-0.18128	358.15274	KNSB-19	-2.23909	219.05822
BH-15	0.37986	348.5153	KNSB-20	-1.43352	205.58624
BH-16	0.92743	339.58622	KNSB-21	-0.60552	196.04222
BH-17	1.56657	327.7397	KNSB-22	-1.06881	201.3455
BH-18	2.135	319.36916	KNSB-23	-1.6881	208.08806
BH-19	3.75601	289.31906	KNSB-24	-2.25496	215.54588
BH-20	10.18532	176.47058	KNSB-25	-2.90139	224.2637

第三章 表土孢粉分析与表土孢粉取样点气象数据重建

BX-1	2.1124	295.913	KNSB-26	-2.27582	215.17352
BX-2	1.45397	304.985	KNSB-27	-2.92225	223.51898
BX-3	0.87354	313.15118	KNSB-28	-2.07653	210.40118
BX-4	0.22711	322.24136	KNSB-29	-1.2321	198.539
BX-5	-0.39089	331.07954	KNSB-30	-0.8901	193.19246
BX-6	-0.91289	338.57372	KNSB-31	-0.92896	193.44446
BX-7	-0.91289	338.57372	KNSB-32	-0.48423	188.4521
BX-8	-0.16889	328.15772	KNSB-35	-0.70724	190.92446
BX-9	0.38311	320.6159	KNSB-36	-1.12152	196.9361
BX-10	1.09711	310.80608	KNSB-37	-0.54266	189.1241
BX-11	1.09111	311.6348	KNSB-38	-0.27737	185.47574
BX-12	0.53911	319.54898	KNSB-39	0.08263	179.50484
BX-13	-0.12846	329.97188	KNSB-40	-0.40679	187.04666
BX-14	-0.69246	337.86788	KNSB-41	-0.82393	193.17866
BX-15	-1.27003	346.09988	KNSB-42	-1.42707	201.5423
BX-16	-1.89403	355.02206	KNSB-43	-1.92664	208.6823
BX-17	-2.48203	363.25406	KNSB-44	-2.45021	216.1583
BX-18	-3.10003	371.90606	KNSB-45	-3.06221	224.54012
BX-19	-3.5276	377.85188	KNSB-46	-2.61978	218.11976
BX-20	-3.0236	370.79588	KNSB-47	-3.14935	225.49358
BX-21	-2.92267	362.0417	KNSB-48	-3.80492	234.6314
BX-22	-2.28067	353.23988	KNSB-49	-4.23092	240.40922
BX-23	-1.16074	344.8217	KNSB-50	-3.56806	231.42122
BX-24	-0.56074	336.60788	KNSB-51	-2.86477	222.57176
BX-25	0.03926	185.594	KNSB-52	-1.78791	208.16012
BX-26	0.67526	319.49006	KNSB-53	-0.92133	197.83502
BX-27	1.32926	310.52024	KNSB-54	0.19439	183.72992
BX-28	1.97569	301.80242	KNSB-55	0.83297	176.22446
BX-29	2.67612	292.14242	KNSB-56	1.81826	162.86846
BX-30	3.23855	284.6006	KNSB-57	2.50826	153.20846
BX-31	3.80698	276.97478	KNSB-58	3.20269	143.07392
BX-32	4.11741	272.77478	KNSB-59	3.8157	134.7692
BX-33	4.8807	262.15442	KNSB-60	3.3717	141.17138
WLGHB-1	6.22328	114.12086	KNSB-61	2.81213	149.33756
WLGHB-2	6.23371	114.12086	KNSB-62	2.37856	156.48446
WLGHB-3	6.18728	114.62486	KNSB-63	3.08185	147.82118
WLGHB-4	6.14371	115.56704	KNSB-64	4.11228	134.84444
WLGHB-5	6.22771	114.20486	KNSB-65	4.81114	126.6557
WLGHB-6	6.23371	114.12086	KNSB-66	5.30073	121.6997
BTB-7	5.64279	104.23952	EEQSH-1	5.37974	124.03604
BTB-8	4.9552	109.91954	EEQSH-2	5.45959	123.4913
BTB-9	4.32234	117.929	EEQSH-3	5.37015	124.87856
BTB-10	3.2826	128.36756	EEQSH-4	5.03314	129.69164
BTB-11	2.7006	136.32938	EEQSH-5	5.36684	139.94348

HZSB-1	-4.16144	212.48408	EEQSH-6	5.31884	139.4984
HZSB-2a	-4.74058	220.6979	EEQSH-7	5.31884	139.4984
HZSB-2b	-4.74058	220.6979	EEQSH-8	5.31884	139.4984
HZSB-3	-5.37058	229.89026	EEQSH-9	5.38557	133.28174
HZSB-4a	-6.05901	239.56844	EEQSH-10	4.96456	133.12688
HZSB-4b	-6.05901	239.56844	EEQSH-11	5.55273	128.4116
HZSB-5	-6.43258	244.94444	EEQSH-12	5.02832	141.18902
HZSB-6	-5.82215	236.73062	EEQSH-13	4.19191	158.14826
HZSB-7	-5.18929	228.16262	EEQSH-14	2.07795	191.83226
HZSB-8	-4.438	218.2688	EEQSH-15	1.55124	198.71336
HZSB-9	-3.68071	207.91862	EEQSH-16	2.67666	178.35776
HZSB-10	-3.07028	199.14626	EEQSH-17	2.9198	174.2894

第四章 艾比湖区中全新世以来古气候定量重建

在运用孢粉数据定量重建古气候方面,研究方法在不断创新,并取得了一些突破,这主要取决于对现代表土层孢粉研究的广泛和深入。这些方法包括主成分分析法、聚类分析、降趋势对应分析法和多元回归分析法等定量模型,以及趋势面分析、转换函数、生物群区和联合指数等。通过对孢粉数据的研究,建立孢粉—古植被—气候序列,进而推测该地环境演化的动态过程,不仅可以深入研究影响环境演化的动力因子和各因子之间的动力学机制,还可进行更深层次的数据挖掘,建立合理且日趋完善的全球变化模型,为预测未来环境演化趋势提供可靠而有力的工具和手段。目前,国内外孢粉研究中应用的数值方法不仅被应用于孢粉组合带和孢粉分区的划分(沈才明等, 1991),也被应用于孢粉组合的变化规律研究(孔昭宸等, 1990)。

4.1 DCCA 分析(典型除趋对应分析)

DCCA 分析是生态学中常用的数量排序方法。也被用来比较不同植被类型花粉组合与异同及确定花粉组合与植被和气候的关系(Seppa H, Birks H J B, Odland A et al. 2004)。本研究的目的是通过对 DCCA 前两轴所有样点得分值得排序,分析影响花粉组合的主要环境因素。具体操作时对出现较少的花粉类型降低权重,以便于降低异常点的干扰(Seppa H, Birks H J B, Odland A 等, 2004; Prentice I C, 1980; Zhang wentong., 2002)。DCCA 分析具体方法如下:

首先将所有样点花粉百分比数据进行 DCA 分析,如果花粉组合梯度长度变化大于 1,表明花粉组合与气候因子的关系是非线性的。可以进行 DCCA 分析。如果梯度长度变化小于 1,则花粉组合与环境因子的关系是线性的。DCCA 不再使用,要改用 RDA (Redundancy Analysis 冗余分析) (Prentice I C, 1998)。在分析的过程中发现,表土样品中的光面单缝孢属含量较少,但是剖面样品中的光面单缝孢的含量在 60% 以上,故数据分析是在去除了这一异常影响值后进行的。为去除气候变量的共线性问题,首先用 DCCA 分析确定气候变量方差膨胀因子的值(VIF)。该因子值越大,相应的变量越有可能是其他变量的线性组合。如果 VIF 值大于 20,表明气候变量间存在明显共线性问题,此时需去除 VIF 值最高的变量,重新进行 DCCA 分析,直至所有气候变量 VIF 值低于 20(C.J.F. ter Braak, Prentice I C, 1988; Lu Houyuan, Wu Naiqin, Yang Xiangdong, 2006)。DCA 和 DCCA 分析均采用 Canoco4.5 程序。

表 4-1 表土样品 DCA 分析结果
Tab4-1 The surface soil samples of DCA analysis

Axes	1	2	3	4	Total inertia
Eigenvalues	0.443	0.237	0.148	0.107	3.285
Lengths of gradient (梯度长度)	3.008	2.695	2.152	1.868	
Cumulative percentage variance of species data	13.5	20.7	25.2	28.5	
Sum of all unconstrained eigenvalues					3.285

由表 1 可看出花粉组合的梯度变化大于 1，说明环境因子和花粉组合变化之间的关系是非线性的，DCCA 分析适用，将数据以 Log 形式转换，进行 DCCA 分析。

表 4-2 表土样品 DCCA 分析结果
Tab4-2 The surface soil samples of DCCA analysis

Axes	1	2	3	4	VIF 值
Eigenvalues	0.164	0.031	0.104	0.074	
Species-environment correlations	0.906	0.733	0.000	0.000	
Cumulative percentage variance of species data	5.8	6.8	10.5	13.1	
of species-environment relation	66.8	85.0	0	0	
Inter set correlations of environmental variables with axes					
年均温	-0.2585	0.7299	-0.1245	-0.1641	1.5098
年降水量	-0.5562	-0.3652	0.1910	0.0298	1.5098

表 2 中的 VIF (变量浮动因子) 值均低于 20，说明相互之间是独立的，艾比湖地区表土孢粉样品中花粉组合和气候的相关性：轴 1 与环境因子相关性为 0.906，轴 2 与环境因子相关性 0.733。年均温与 1 轴样品得分之间的相关系数为-0.2585，呈负相关；与轴 2 的相关系数为 0.7299，相关性较大。年降水量与轴 1 相关系数为-0.5562，呈负相关，相关性较大；与轴 2 相关系数为-0.3652。因此说明表土孢粉样品能较好的反应样点气候特征。

4.2 孢粉数据定量重建古气候常用方法

1、孢粉复合度-气候转换函数方法

该方法简便易行，且由于所使用的是孢粉组合，所以它实际上反映了植物群落与气候的关系，因而精确度高，适用范围较广，但其前期假设条件过多。

2、孢粉-气候因子转换函数

转换函数的缺陷在于其基础是建立在一系列生态假设上的，因此其精确程度与表

土样品的数量存在着密切联系，且与样品分析结果的准确性直接相关，由于转换函数法假定花粉与气候间具有线性关系，且目前在我国只适用于北方受破坏程度较低的地区。

3、孢粉-气候对应分析

又称 R-Q 型因子分析，把二者结合起来，使其具有相同的主因子，从而揭示样品与变量间的内在联系，通过因子分析，可以把复杂的多变量归结为几个独立的新变量，确定起主要作用的因素。

4、孢粉-气候响应面模型

能够提供更多的气候变迁细节，且能提供定量的古气候数据，便于据此检验全球变化模型的可靠性及可信度，花粉-气候响应面模型多针对某一小区域，一般不适应范围过大的区域。

5、共存因子分析法

该方法得出的气候参数精度较高，简便易行，是未来古气候定量重建的重要方法。但对于前期数据的处理要求难度较大，数据获取也较难。

4.3 WAPLS 模型建立

运用孢粉分析资料定量重建古气候方法在理论研究中不断改进和创新，取得了一些突破，在实际运用中也已取得丰硕的成果。通过对孢粉进行研究，建立孢粉-气候序列，进而推测该地环境演化的动态过程，这样不仅可以深入研究影响环境演化的动力因子和各因子之间的动力学机制，还可以进行更深层次的数据挖掘，建立合理而且日趋完善的全球变化模型，为预测未来环境演化趋势提供可靠而有力的工具和手段。但方法的改进，往往简化了计算的过程，而要提高研究结果的精度和准确度，就需要有更精确的基础数据支撑。因此，方法改进与数据的获取将是定量重建古气候的关键。

表土孢粉-气候参数定量转换使用加权平均偏最小二乘 (WAPLS) 方法 (Birks H J B, Line J M, Juggins S 等, 1990; Birks H J B, 1995; Birks H J B, 1998; C J F ter Braak, Juggins S, 1993; Jongman R H G, ter Braak C J F, Van Tongeren O F R, 1995) 进行。其原理是首先通过加权平均回归 (即只利用偏最小二乘回归第一组分) 拟合孢粉组合与气候参数之间的函数关系，然后利用 PLS 其他组分完善修饰，减小最终转换函数模型的预测误差 (Birks H J B, 1998; Braak C J F, Juggins S, 1993)。其数量关系模型公式及操作步骤如下：

设 X 为环境变量； Y 为物种变量和样点的矩阵

(1) PLS (偏最小二乘法)

第一步：把环境变量 X_i (x_i 表示环境变量 x 在样点 i 时的值) 作为初始的样点

得分值 r_i

第二步：物种得分值：样点得分总和进行权重 $b_k = \sum_i Y_{ik} r_i$

(注明： Y_{ik} 表示物种 k 在样点 i 的百分比)

第三步：样点得分值：把物种得分值总数进行权重 $r_i = \sum_k Y_{ik} b_k$

第四步：第一因子做第五步，对第二到更高因子，使得正交化的新样点得分 (r_i) 与前一因子无关

第五步：标准化新样点的得分值 (r_i)

第六步：把标准化的得分值作为新因子

第七步：环境变量和新因子进行回归，选择合适的值作为当前的估测值。回到第二步，对残差进行回归并作为新的样点得分值 (r_i)

(2) WA(加权平均回归)

第一步：通过样点的 X 值的平均值的权重来估测物种的最优值

$$u_k = \sum_i Y_{ik} x_i / Y_{+k}$$

第二步：把物种的最优值进行平均再权重，从而得到估测样点的 X 值 $X_i = \sum_k Y_{ik} u_k / Y_{i+}$

第三步：把环境变量 (X_i^*) 的最初估测值 (X_i) 进行回归，选择合适的值作为估测值 (X_i^*)

根据地层物种孢粉组合来推测环境值

$X_0 = a_0 + a_1 x_0 = a_0 + a_1 \sum_k Y_{0k} u_k / Y_{0+} = \sum_k Y_{0k} u_k^* / Y_{0+}$ (注明： $u_k^* = a_0 + a_1 u_k$;
 a_0, a_1 为系数)

(3) WA-PLS(加权平均偏最小二乘法)

第一步：通过减去权重平均值来对环境变量进行中心化

$$x_i = x_i - \sum_i Y_i + x_i / y_{++}$$

第二步：把中心化的环境变量 (x_i) 列为初始的样点得分值 (r_i)

对每个因子执行以下步骤：

第三步：对样点得分的平均值进行权重来计算新的物种得分

$$u_k = \sum_i Y_{ik} r_i / y_{+k}$$

第四步：把物种得分值得平均值进行权重，计算得出样点得分 (r_i)

$$r_i = \sum_k Y_{ik} u_k / y_{i+}$$

第五步：对第一个因子做第五步，对第二或更高的因子，通过正交后的新的样点得分值 (r_i) 与以前因子无关

第六步：对新的样点得分值进行标准化

第七步：把标准化后的得分值选为新因子

第八步：用权重值 (Y_{i+}, Y_{++}) 在新的因子上对环境变量进行回归，从而选择合

适值作为当前估测值。操作第二步：把回归的残差作为新的样点得分值 (ri)

拥有最低的推导误差 (Root mean square error of prediction, 简称 RMSEP) 以及最高的推导值与实测值之间的决定系数 (adjusted coefficients of determination, 简称 R^2) (温瑞林等, 2010) 的转换函数模型被最终选择用来定量重建艾比湖剖面的古气候参数。WAPLS 方法特别适用于干扰大、种类多的孢粉组合数据, 譬如某些孢粉种属在许多样品中不出现或者具有广泛的生态幅的情况 (Hill M O, Gauch H G, 1980; C J F ter Braak, Prentice I C. A, 1988), 因此适合艾比湖古气候参数的定量重建。

表 4-3 WAPLS 转换函数模型检验结果
Tab4-3 WAPLS conversion function model test results

WAPLS Componmet	年均温/ $^{\circ}\text{C}$		年降水量/mm	
	RMSEP	R-squared	RMSEP	R-squared
1	2.9059	0.5031	67.1805	0.4928
2	2.7015	0.5694	65.2253	0.528
3	3.2168	0.4743	66.3002	0.526
4	3.7445	0.4191	70.1889	0.5037
5	4.3052	0.3774	80.2291	0.4475
6	4.6905	0.3631	87.274	0.4242

注明: 黑色倾斜字体是具有最小推导误差及最高决定系数的模型

214 个样本被用来推断气候, 花粉和气候的转换函数使用 WAPLS 模型 (Birks, 1995), 交叉验证的结果见图, 其中 6 个转换函数被测试, 最好的年均温模型是第 2 个, 年降水量也是第 2 个模型, 观察预测的年均温 ($R^2=0.5694$; RMSEP=2.7015 $^{\circ}\text{C}$) 和年降水量 ($R^2=0.528$; RMSEP=65.2253) 有适度的相关性, 说明建立的艾比湖地区表土孢粉与气候之间的关系模型 (WALPS) 可用。因此, 利用此模型定量恢复出了艾比湖剖面古气候要素。

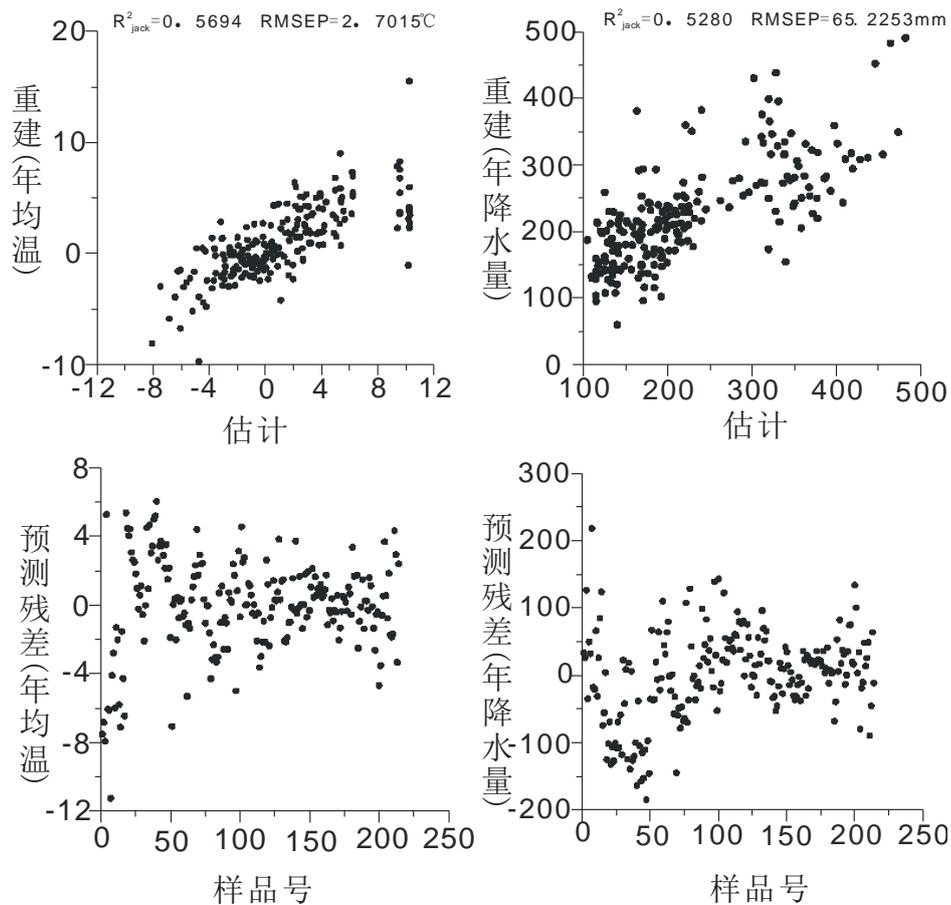


图 4-1 WAPLS 方法交叉验证结果

Fig4-1 The WAPLS cross-validation results

第五章 艾比湖地区中全新世以来环境演变

国家自然科学基金项目“新疆天山中段晚全新世以来气候与植被变化的孢粉学研究”（40972212）研究课题组在艾比湖自然保护区桦树林保护站内用湖泊取样器完成一个浅孔，获取了 1.7m 完整岩芯。地理坐标为 $83^{\circ} 44' 43.4''E$, $44^{\circ} 34' 15.6''N$, 海拔高度 355m。植被调查: $2 \times 2m^2$ 草本层盖度为 100%，其中灰藜盖度可为 90%，还有甘草、芦苇，骆驼蹄瓣、百合科、牛皮消，距桦木林有 200m。该剖面自上而下描述如下：

第一层:0-52cm, 厚 52cm, 深棕色土壤层, 无粘性, 腐殖层厚; 20~25cm 处取 14C 样品。

第二层:52-80cm, 厚 28cm, 灰白色粉砂层, 质地均一, 粘性大。

第三层:80-90cm, 厚 10cm, 浅棕色粘土层。

第四层: 90-100cm, 厚 10cm, 灰白色粉砂层, 质地均一, 粘性大, 有小根系。

第五层: 100-140cm, 厚 40cm, 深灰色粉砂层; 105~110cm 处取 14C 样品。

第六层: 148-150cm, 厚 10cm, 灰白色粉砂层, 质地均一, 粘性大, 有小根系。

第七层: 150-170cm, 厚 20cm, 灰色粘土层; 165~170cm 处取 14C 样品。

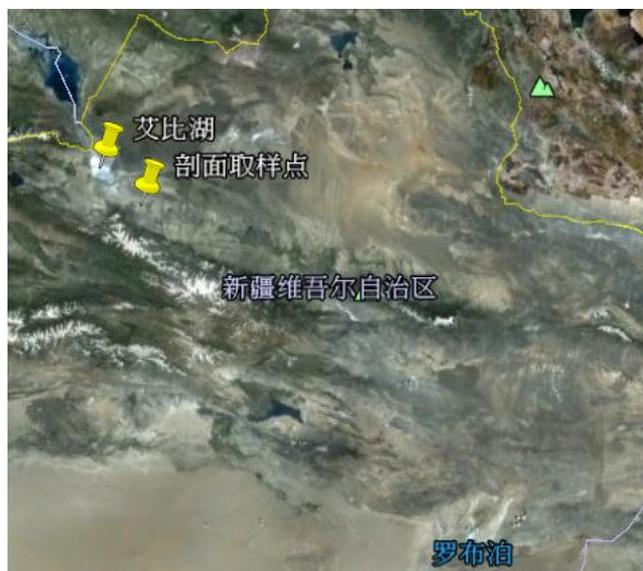


图5-1 艾比湖剖面取样点位置

Fig5-1 The profile location of Ebinur Lake sampling points

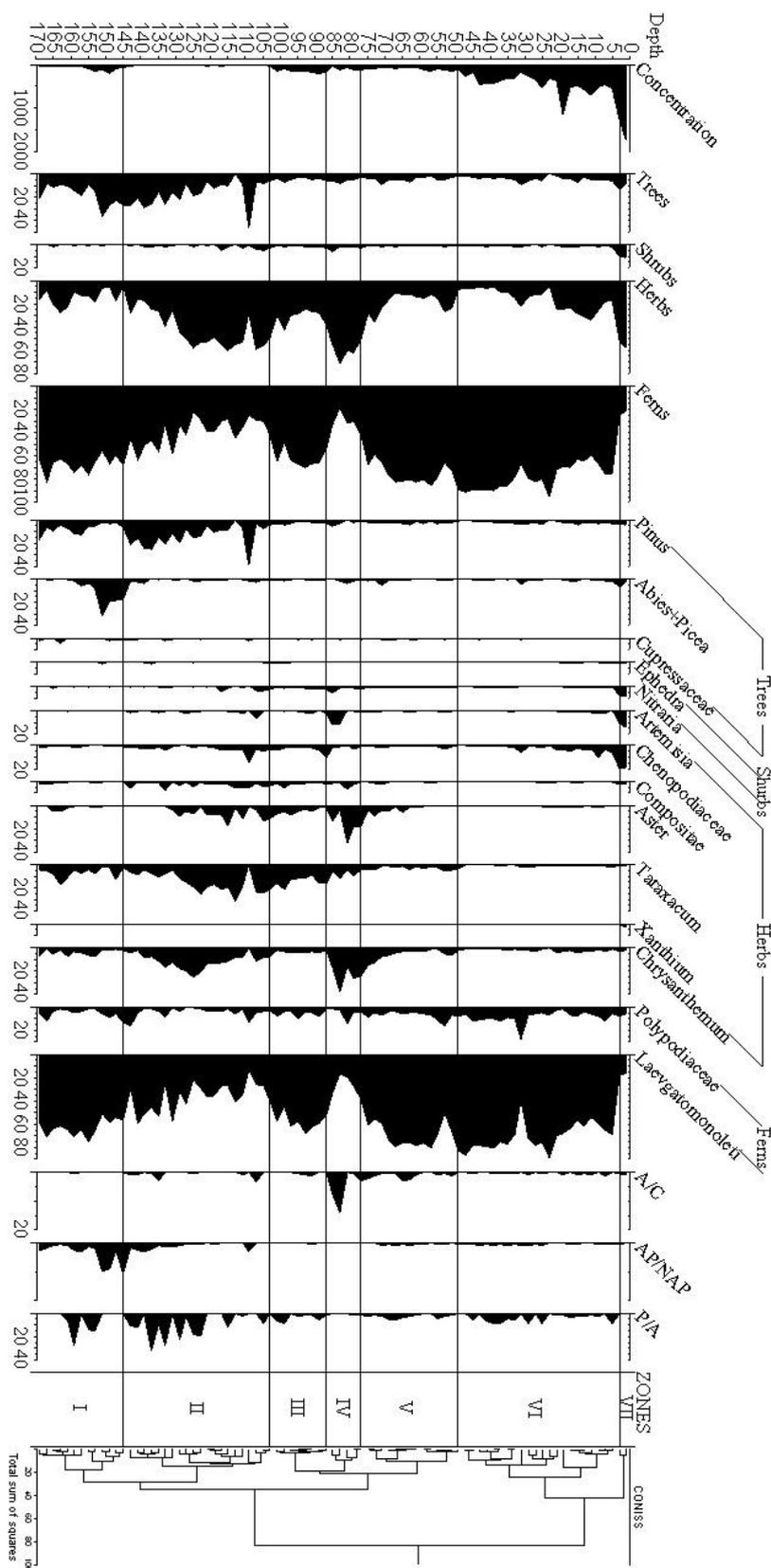


图5-2 艾比湖剖面孢粉组合

Fig5-2 The profile sporopollen assemblage in the Ebinur Lake

5.1 剖面孢粉分析

取自艾比湖自然保护区桦树林保护站内的 85 个剖面孢粉样品在镜下共统计鉴定孢粉 20838 粒, 平均每个样品约 245 粒, 这些孢粉分属 75 个科属植物类型, 具体成分如下:

乔木植物花粉主要有 12 种: 柏科 (*Cupressaceae*)、云杉属 (*Picea*)、冷杉属 (*Abies*)、松属 (*Pinus*)、落叶松属 (*Larix*)、桦属 (*Betula*)、杉科 (*Taxodiaceae*)、鹅耳枥属 (*Carpinus*)、槭树属 (*Acer*)、胡桃属 (*Juglans*)、栎属 (*Quercus*)、榆属 (*Ulmus*);

灌木植物花粉有 7 种: 麻黄属 (*Ephedra*)、榛属 (*Corylus*)、白刺属 (*Nitraria*)、芸香科 (*Rutaceae*)、锦葵科 (*Malvaceae*)、水柏枝属 (*Myricaria*)、丁香 (*Syringa*);

草本植物花粉主要有 46 种: 禾本科 (*Gramineae*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、菊科 (*Compositae*)、蒿属 (*Artemisia*)、豆科 (*Leguminosae*)、毛茛科 (*Ranunculaceae*)、唐松草 (*Thalictrum*)、蓼科 (*Polygonaceae*)、茄科 (*Solanaceae*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、旋花科 (*Convolvulaceae*)、茜草科 (*Rubiaceae*)、唇形科 (*Labiatae*)、伞形科 (*Umbelliferae*)、龙胆科 (*Gentianaceae*)、兰雪科 (*Plumbaginaceae*)、律草属 (*Humulus*)、石竹科 (*Caryophyllaceae*)、百合科 (*Liliaceae*)、十字花科 (*Cruciferae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、香蒲属 (*Typha*)、苍耳属 (*Xanthium*)、骆驼刺属 (*Alhagi*)、紫菀属 (*Aster*)、蒲公英属 (*Taraxacum*)、菊属 (*Chrysanthemum*)、酸模属 (*Rumex*)、蓼属 (*Polygonum*)、蝶型花亚科 (*Faboideae*)、荞麦属 (*Fagopyrum*)、委陵菜属 (*Potentilla*)、老鹳草 (*Geranium*)、黑三棱属 (*Sparganium*)、败酱科 (*Valerianaceae*)、博落回属 (*Macleaya*)、玄参科 (*Scrophulariaceae*)、景天属 (*Sedum*)、狐尾藻属 (*Myriophyllum*)、绣线菊 (*Spiraea*)、锦鸡儿 (*Caragana*)、云实 (*Caesalpinia*)、大戟科 (*Euphorbiaceae*)、大戟 (*Euphorbia*)、清风藤科 (*Sabia*)、桔梗科 (*Campanulaceae*);

蕨类植物孢子主要有 10 种: 石松 (*Lycopodium*)、卷柏属 (*Sellaginella*)、铁线蕨属 (*Adiantum*)、水龙骨科 (*Polypodiaceae*)、蹄盖蕨属 (*Athyrium*)、膜蕨科 (*Hymenophyllaceae*)、珠蕨属 (*Cryptogramma*)、沼泽蕨 (*Thelypteris*)、光面单缝孢 (*Laevgatomoletti*)、双星藻 (*Zygenma*)。

5.2 艾比湖剖面组合带的划分及组合特征

该剖面反映了 4730aB. P. 以来该区的植被变化和气候特征, 地层自下而上划分出 6 个孢粉带 (图)

带 I (169-145cm, 4730-4014a B.P.) : 本带包括 13 个样品, 共鉴定孢粉 3000 粒, 平均浓度 77.8 粒/g, 浓度较低, 是以蕨类孢子为主的孢粉组合带; 其中乔木花粉占 17.8%, 以云杉+冷杉为主 (8.8%), 松属占 7.5%, 松属花粉低于 30%, 可以认为外来花粉; 灌木植物花粉较少; 草本植物花粉以蒲公英属和菊属为主, 但含量较少, 分别为 (6.2%) 和 (3.5%); 蕨类孢子中, 光面单缝孢占整个孢粉带的 62.3%, 水龙骨科占 5.2%; 总体来看, 该带反映的是以云杉+冷杉和蕨类孢子为主的孢粉组合带, 反应了当时较冷湿的气候类型。

带 II (103-145cm, 4014-2780a B.P.) : 本带 21 个样品共鉴定花粉 2761 粒, 平均浓度 21.2 粒/g, 浓度较上一带更低; 本带中, 乔木花粉占 16.1%, 以松属为主 (13.9%); 灌木花粉含量较低 (1.6%); 草本花粉占 42.9%, 分别为蒲公英属 (14.8%)、菊属 (11.1%)、紫菀 (4.9%), 以及少量的菊科、藜科、和蒿属; 蕨类孢子占 39.4%, 较上一带明显减少, 仍以光面单缝孢和水龙骨科为主; 总体来看, 该带反映的植被类型以草本为主, 松属花粉仍然认为是外来花粉, 反映了较温干的气候类型。

带 III (87-103cm, 2780-2382a B.P.) : 本带 8 个样品共鉴定孢粉 1995 粒, 平均浓度 161.1 粒/g, 浓度较上一带有明显的增加; 本带中, 乔木花粉较上一带明显减少 (4.6%); 灌木植物花粉含量依然较低 (1.7%); 草本植物花粉占 31%, 较上带有下降趋势, 主要有蒲公英属 (13.9%)、紫菀 (4.1%)、菊属 (3.1%), 以及少量蒿属、藜科、菊科; 蕨类孢子较上一带有较明显的增加, 占 62.7%, 主要为光面单缝孢 (57.5%) 和水龙骨科 (4.9%); 综合判断, 该带由上一带较干的气候类型转为较湿的气候类型。

带 IV (77-87cm, 2382-2134a B.P.) : 本带 5 个样品共鉴定孢粉 829 粒, 平均浓度 93.5 粒/g, 浓度较上一带明显降低; 本带乔木花粉较上一代变化不大 (5.5%), 灌木花粉含量较低 (2.9%), 主要为白刺属 (2.7%), 草本植物花粉含量明显增加 (60.2%), 主要为菊属 (23.7%)、紫菀 (16.7%)、蒲公英属 (6.9%), 还有一定量的蒿属、藜科, 蕨类孢子较上一带明显减少, 为 31.4%; 综合来看, 该带反映的植被类型为荒漠植被类型, 指示了较干的气候类型。

带 V (49-77cm, 2134-1437a B.P.) : 本带 14 个样品共鉴定孢粉 3714 粒, 平均浓度 100.2 粒/g, 浓度较上一带减少; 本带中, 乔木和灌木植物花粉的含量变化不大, 草本花粉明显减少 (18%), 蕨类孢子明显增加 (76.6%), 其中光面单缝孢为 69.9%; 因此该带反映的是温湿的气候类型。

带 VI (3-49cm, 1437-131a B.P.) : 本带 22 个样品共鉴定孢粉 7688 粒, 平均浓度为 311.2 粒/g, 该带的浓度较之前几个孢粉组合带有明显增加; 本带中, 乔木花粉较上一带变化不大, 为 4.3%, 主要为松属、云杉和冷杉; 灌木花粉含量依然较小; 草本植物花粉中, 藜科含量最多 (2.2%), 还有少量的菊属花粉和蒲公英属花粉; 蕨类孢

子在该带为 78.2%，主要为光面单缝孢（69.9%）和水龙骨科（8.0%）；整体来看，该带反映的是温湿的气候类型。

带 VII（1-3cm, 131a B.P. 至今）：本带 2 个样品鉴定孢粉 851 粒，平均浓度为 1505.6 粒/g，该带的浓度为剖面的最高值；灌木和草本植物花粉在本带有明显增加，分别为 10.6%和 54.9%，蕨类孢子明显减少，为 23.6%；草本植物以藜科和蒿属最多，分别为 18.8%和 13.0%；整体来看，该孢粉组合带以喜干的草本植物花粉为主，反映是温干的气候类型。

总体来看，孢粉图谱反映了 4730 年以来，艾比湖地区气候由湿到干的三个变化旋回。

5.3 艾比湖剖面古气候定量重建

5.3.1 艾比湖剖面古气候重建数值

将艾比湖剖面定量重建后结果如下：

表5-1 艾比湖剖面古气候重建数值

Tab5-1 The profile of Ebinur Lake paleoclimate reconstruction

depth(cm)	T (°C)	P (mm)	depth(cm)	T (°C)	P (mm)
1	5.2397	210.8398	87	-0.9514	299.0299
3	4.9692	226.9788	89	-2.3712	321.6657
5	0.2153	286.2496	91	-1.8635	331.9963
7	0.8641	340.5087	93	-2.5533	321.7721
9	1.7758	326.6957	95	-2.4745	400.3036
11	-0.797	381.5161	97	-4.8771	384.9388
13	-0.4214	337.2993	99	-4.5928	382.4301
15	0.2015	320.1344	101	-3.4986	367.2986
17	0.8241	332.8253	103	-4.6977	355.3261
19	0.15	277.9719	105	-3.4869	318.9228
21	-0.4843	296.8263	107	-2.4048	303.6422
23	1.3499	496.2116	109	0.2664	252.4648
25	-4.92E-02	284.7443	111	-4.2251	297.1641
27	-1.0518	308.7968	113	-6.6583	413.1628
29	-1.4378	285.4215	115	-4.1721	306.0898
31	1.8097	422.3785	117	-2.5252	289.291
33	1.2118	337.5664	119	-4.9894	287.5835
35	0.5	320.2063	121	-4.9632	324.8025
37	1.0947	336.2214	123	-4.9524	188.7888
39	1.1854	315.2045	125	-4.2081	177.1834
41	2.4369	302.2478	127	-4.7876	179.3696
43	2.5011	406.0631	129	-4.0157	203.2578

45	2.3569	352.7645	131	-2.8981	145.8139
47	1.0043	388.6079	133	-1.8246	204.0766
49	-3.06E-02	380.4255	135	-3.4432	196.1082
51	-0.6447	302.7449	137	-2.9542	178.6615
53	0.5954	370.2005	139	-2.3543	122.1477
55	0.3432	378.2895	141	-3.2548	239.493
57	-3.47E-02	476.8099	143	-1.6805	319.123
59	-1.6828	346.9805	145	-0.5121	298.9578
61	4.07E-02	307.7604	147	-3.8121	365.2805
63	-1.4219	288.6875	149	-0.8862	285.2704
65	-0.8896	309.3735	151	-1.3544	253.1015
67	0.6495	206.3945	153	-3.4556	183.5274
69	-0.9763	223.4507	155	-2.2183	155.7556
71	2.17E-02	279.5415	157	-3.7865	253.4958
73	-1.993	266.8433	159	-2.1334	193.5541
75	-1.7169	204.5997	161	-4.3583	241.3242
77	-1.484	172.7244	163	-6.6414	389.6827
79	-2.9042	208.5666	165	-3.4828	279.9221
81	-3.021	391.1282	167	-1.5319	419.1344
83	-1.9572	111.1981	169	-2.1903	197.0789
85	0.2206	197.6392			

5.3.2 艾比湖剖面古气候曲线

将上述数据作图，可直观观察中全新世以来艾比湖地区的古气候演化：

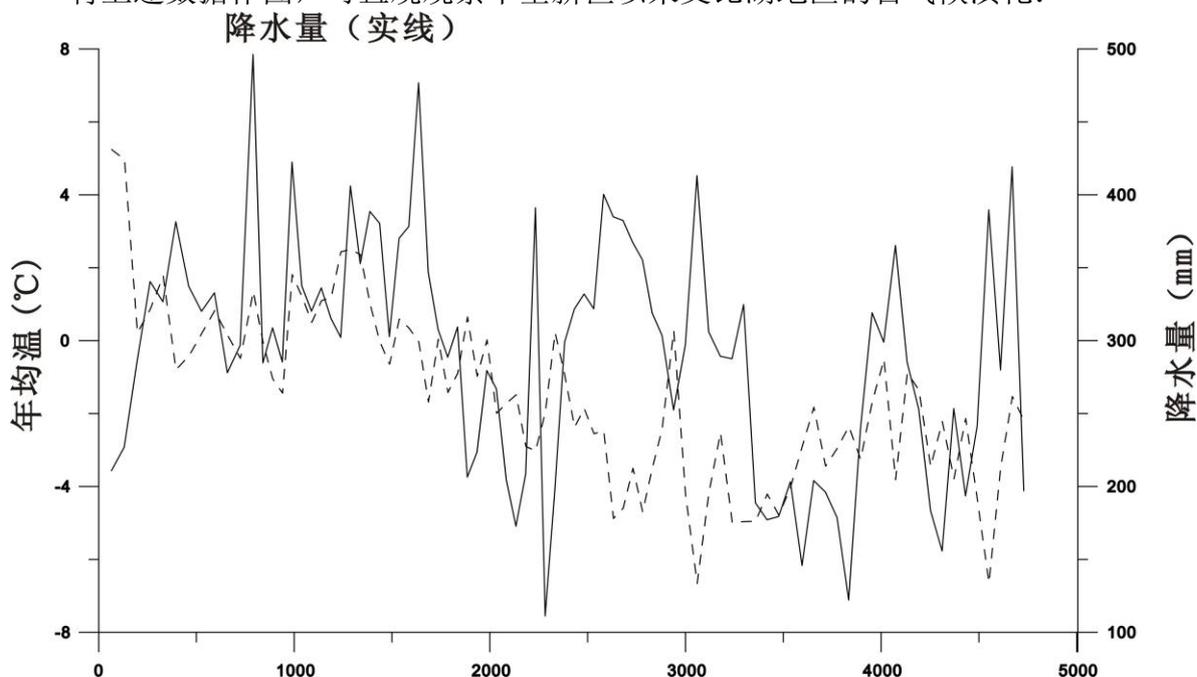


图5-3 艾比湖剖面古气候曲线

Fig5-3 The profile of Ebinur Lake paleoclimate curve

第六章 结论与讨论

6.1 结论

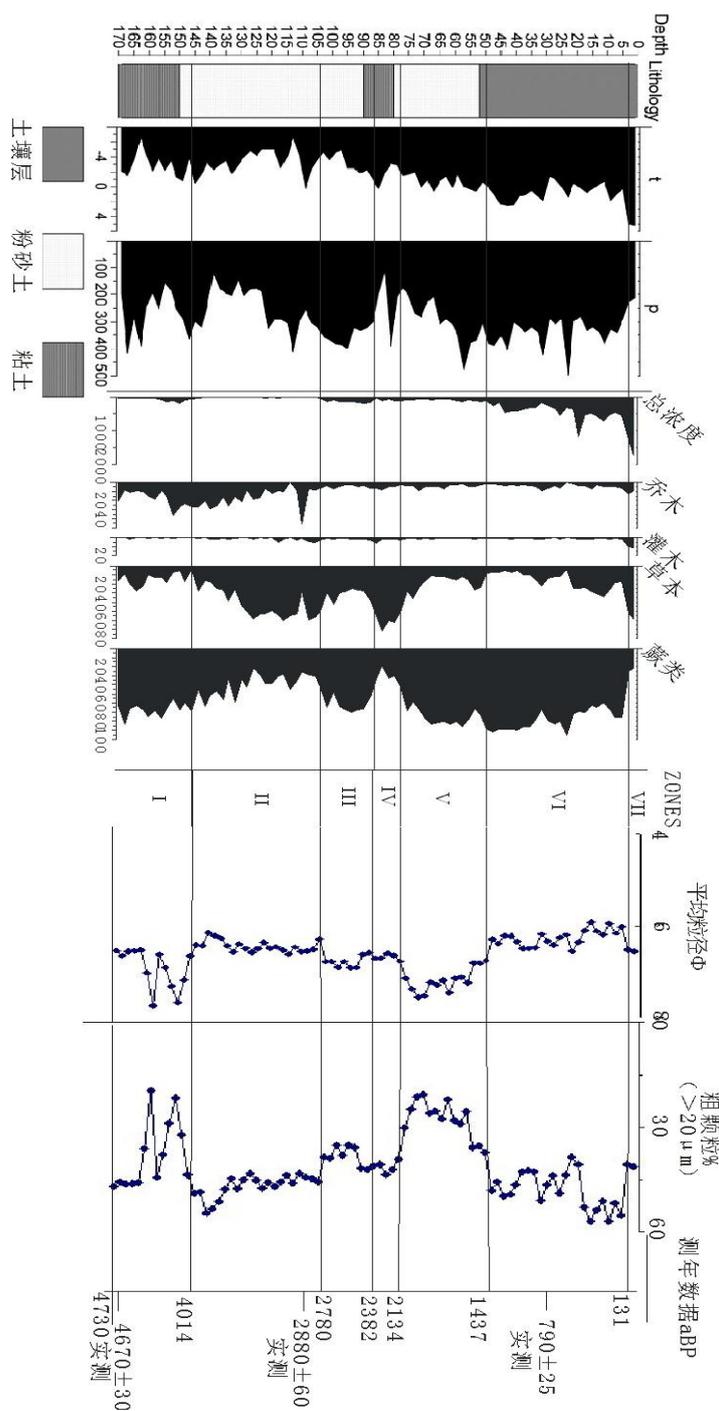


图 6-1 艾比湖地区环境演变

Fig 6-1 Environment change in Ebinur Lake

根据孢粉谱的划分方案,艾比湖区中全新世以来植被和气候变迁历史分阶段描述如下:

在(4730-4014a B.P.)期间,孢粉总浓度最低,在艾比湖地区,乔木植物花粉中松属的含量低于30%,可以认定为外来花粉;但是云杉+冷杉含量为全新世以来最高值,至少说明流域的气候是较冷的;这一时期,蕨类孢子含量较高,但是少有水生植物黑三棱和香蒲属花粉出现,说明气候环境潮湿;定量重建的结果表明这段时期,艾比湖地区气温在 -6.6°C - -0.5°C 之间,平均 -2.8°C ;降水量在193.5mm-419.1mm之间,平均270.5mm,在剖面中温度处于较低值,降水量高于现在的90.9mm,温度明显低于现在的 8.3°C ;此段从整体上来看,其岩性为灰色粘土层,粒度分析结果表明,这段时期内平均粒径较小,反映了较强的水动力条件,综合分析,这段时期艾比湖地区表现为较冷湿的气候特征。

在(4014-2780a B.P.)期间,松属花粉增加明显,但仍低于30%;草本植物花粉含量明显增加,反映干旱气候条件的藜科、菊属、蒲公英属、紫菀属较上一时期均有明显增加;这一带,蕨类孢子含量明显减少,综合来看表明此时气候变干;定量重建结果表明,此时期内,艾比湖的温度在 -6.7°C - -0.3°C 之间,平均 -3.5°C ,降水量在122.1mm-413.1mm之间,平均252.5mm,其中,温度处于剖面最低值,降水较上一带减少,但仍高于现在的年均降水量;此段从整体上来看,其岩性为深灰色粉砂层,粒度分析结果表明,这段时期内平均粒径较上一带增加,反映了较弱的水动力条件,综合分析,这段时期艾比湖地区荒漠化严重,表现为较冷干的气候特征;而且,此段极可能反映了3.2-2.7ka B.P.的新冰期降温事件。

在(2780-2382a B.P.)期间,总体来看,花粉总浓度增加,草本植物花粉含量与上一带基本持平,蕨类孢子含量增加,表明该带较上一带气候变湿;从岩性来看,此段主要为粉砂土,质地均一,反应较稳定的沉积环境,平均粒径变小,反映了较强的水动力条件;定量重建表明,该段温度在 -1 到 -4.9°C 之间,平均 -2.9°C ,较上一带温度上升;降水量在299-400mm之间,平均351mm,较上一带增加明显,处于剖面最高值;综合分析,这段时期艾比湖地区气候比较湿润。

在(2382-2134a B.P.)期间,总体来看,花粉总浓度减小,草本植物花粉含量较上一带增加明显,而蕨类孢子含量明显降低;草本中的紫菀和菊属花粉含量突然变大,光面单缝孢的含量减少,而且平均粒径增大,反映较小的水动力条件,即出现了一个变干的过程,即约公元前300~400年之间,是艾比湖面积缩小时期(阎顺,2003)。此段从整体上来看,其岩性为浅棕色粘土层;经过定量重建,显示该带平均气温 -1.8°C ,平均降水量为216mm,温度升高,降水减少,推算该段属于中国历史上的战国时期,竺可桢先生认为战国时代,中国气候属于相对温暖期(竺可桢,1979),当时新疆北部可能呈现暖干的气候环境,艾比湖湖面积属于缩小期。总体来看,在此带,

艾比湖地区应该经历了由温湿向暖干的演变过程。

在(2134-1437a B.P.)期间,乔木植物花粉较上一带变化不大,草本植物花粉较上一带明显减少,蕨类孢子含量增加,表明该带较上一带气候变湿;并且该带平均粒径减小,岩性主要为灰白色粉砂土,亦反映了较强的水动力条件;定量重建后,该带平均温度 -0.6°C ,较上一带有明显上升,但明显低于现在年均温;平均降水量为310mm,处于剖面较高值;此带反映了这700年之间较温湿的气候环境。

在(1437-131a B.P.)期间,该带的浓度较之前几个孢粉组合带有明显增加,乔木植物花粉较上一带变化不大,草本植物花粉和蕨类孢子较上一带变化也不大,但是代表干旱的菊属明显减少,香蒲属在该带的出现表明此时艾比湖湖水盐度降低;剖面在该段的岩性为深棕色土壤层;定量重建后,该段的温度在 $-1.4-2.5^{\circ}\text{C}$ 之间,平均 0.7°C ,较上一带升高 1.3°C ,降水量在285.4-496.2mm之间,平均降水量为339mm,处于剖面较高值,但是此时的粒度特征表现为平均粒径的增大,反映的是较弱的水动力条件,分析可能是由于人类生活的干扰造成的,比如说围坝蓄水等;但是从本段后期看,蕨类孢子的增多以及温度的下降可能显示的是约17世纪中至19世纪初的小冰期,也是艾比湖的水位上升期(阎顺,2003);总体来看,此带反应了温湿的气候环境。

在(131a B.P.至今)期间,该带的总浓度达到剖面的最高值,乔木、灌木和草本植物花粉均有明显的增加,其中草本中的蒿属、藜科、白刺增加明显,蕨类孢子中,光面单缝孢和水龙骨科明显减少;该段岩性认为深棕色土壤层;定量重建后该段温度在 $5.0-5.2^{\circ}\text{C}$ 之间,平均 5.1°C ,降水量在211-227mm之间,平均224mm,该段温度明显升高,处于剖面的最高值,但降水量处于剖面的最低值,反应了暖干的气候特征。

6.2 讨论

(1) 表土孢粉组合和孢粉植物群与当地现代区域植被的特征,总的看来,孢粉植物群与现代植被分布之间没有大的差别,大体上是比较一致的,在低海拔地区草本植物蒿属、藜科为优势种,孢粉组合反映了在艾比湖地区主要为荒漠,荒漠草原,亚高山草甸,高山草甸,和桦树林保护区植被景观;艾比湖地区随着海拔的上升与下降,植被景观呈现出规律性的变化,低海拔地区主要为荒漠植被类型,随着海拔的升高,温度的降低,湿度相对增加,为亚高山、高山草甸植被类型;在艾比湖地区表土孢粉样品水平样带上,在沟谷河流下游地区的孢粉种类多于上游地区,因此表明在艾比湖地区流水对孢粉的运移作用较明显。

(2) 根据艾比湖地区表土孢粉分析结果,蒿属、藜科花粉的分布在垂直地域上有一定的分布空间,在艾比湖地区蒿属、藜科的广泛分布高度为190-2000m之间,这

种现象与二者花粉产量大、传播能力强有关。高于这个海拔，蒿属和藜科花粉的含量比例下降，转为针叶林或亚高山草甸、高山草甸植被景观。

(3)根据上述环境信息和测年资料进行综合分析，可以推测，距今约 4700 年来，艾比湖地区的沉积环境总体是比较稳定的。约在公元前 300~400 年，艾比湖地区气候干旱，是艾比湖面积缩小时期，当时的湖泊面积远小于后来的高湖面时期，推算该段属于中国历史上的战国时期，战国时代，中国气候属于相对温暖期，当时新疆北部可能呈现暖干的气候环境。约公元 300~1 400 年，即东晋至 15 世纪初，是艾比湖的高水位时期。这反映了在中世纪，艾比湖地区的环境可能明显好于现代。本段后期看，蕨类孢子的增多以及温度的下降可能显示的是约 17 世纪中至 19 世纪初的小冰期，小冰期是气候相对寒冷的一个时期，当时天山冰川普遍前进并形成明显的冰碛垅，艾比湖地区处于西风带，受季风影响很弱，在气候冷期，受源于大西洋的西风带强烈南移及其气旋风加强影响，带来较多的水汽。此时的艾比湖水位处在一个相对上升期。近 200 年来，由于人类活动的影响，艾比湖地区日益干旱，湖滨地区荒漠化程度加剧，成为中国西部沙尘暴主要策源地之一。

(4)在对艾比湖地区孢粉资料进行定量重建时发现，一些植物种类在表土孢粉中出现不多，但是在剖面孢粉样品中出现大量这类植物孢粉，那么这样再进行数据分析时会对结果产生较大的影响，因此在数据分析过程中，避免了这种异常数据的影响，进而能进一步提高重建结果准确率。

艾比湖中全新世以来的环境演变过程符合前人总结的亚洲中部干旱区西风带影响模式，其表现为中全新以来较湿润的气候类型。应用 WAPLS（加权平均最小二乘法）恢复的艾比湖地区古气候，在与前人研究成果吻合的基础上，定量的恢复了古温度，古降水特征，为该地区研究提供了具体数值资料。但是由于表土样点的数量以及气象站数据量较少、测年方法单一等原因，可能在合理的范围内会有一些误差，这些需要在日后工作中改进与完善。

参考文献

- [1] 孙湘君, 王奉瑜, 宋长青. 中国北方部分科属花粉—气候响应面分析[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(5):431-436
- [2] 潘安定, 陈碧姍, 刘会平等. 孢粉学定量重建古气候方法探讨[J]. 热带地理, 2008, 28(6): 493~497
- [3] 韩德林. 新疆地理手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 3-11. 1993
- [4] 阎顺. 艾比湖及周边地区环境演变与对策[J]. 干旱区资源与环境, 1996, (1): 30~ 37.
- [5] 郑喜玉, 李秉孝, 高章洪, 等. 新疆盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 99~ 109.
- [6] Håkanson L, Jansson M. Principles of Lake Sedimentology, Berlin; Springer-Verlag, 1983, 1-316
- [7] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖记录为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881~887
- [8] 孙千里, 肖举乐. 岱海沉积记录的季风 / 干旱过渡区全新世适宜期特征[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 781~790
- [9] 薛积彬, 钟 巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 610~620
- [10] 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 等. 孢粉记录的岱海盆地 1500 年以来气候变化[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 341~347
- [11] 喻春霞, 罗运利, 孙湘君. 吉林柳河哈尼湖 13.1~4.5 cal. ka B.P. 古气候演化的高分辨率孢粉记录[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 929~938
- [12] 肖霞云, 沈 吉, 肖海丰等. 云南鹤庆盆地 2.780~1.802 Ma B. P. 期间的古植被和古气候[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 417~426
- [13] Imbrie J D, Kipp N G. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: Application to a Late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian K K ed. The Late Cenozoic Glacial Ages. New Haven, CT, Yale University Press, 1971: 71~181
- [14] Bartlein P J, Webb III T, Flörke E. Holocene climatic change in the Northern Midwest: Pollen-derived estimates. Quaternary Research, 1984, 22: 361~374
- [15] Guiot J. Late Quaternary climatic change in France estimated from multivariate pollen time series. Quaternary Research, 1987, 28: 100~118
- [16] 吴敬禄. 新疆艾比湖全新以来的环境变迁与古气候[J]. 海洋与湖沼. 1996, 27(5): 524~530
- [17] Kröpelin S, Verschuren D, Lezine A M, Eggermont H, Cocquyt C, Francus P, Cazet J P, Fagot M, Rumes B, Russell J M, Darius F, Conley D J, Schuster M, von Suchodoletz H, Engstrom D R. Climate-Driven ecosystem succession in the Sahara: the past 6000 years. Science 2008. 320 (5877): 765-768

- [18] Zhang Y, Kong Z C, Yan S, Yang Z J, Ni J. "Medieval Warm Period" on the northern slope of central Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Geophysical Research Letters*. 2009. 36, L11702, doi:10.1029/2009GL037375
- [19] Jim énez-Moreno G, Anderson R S. Holocene vegetation and climate change recorded in alpine bog sediments from the Borreguiles de la Virgen, Sierra Nevada, southern Spain. *Quaternary Research*. 2012, 77(1): 44-53
- [20] Bamonte F P, Mancini M V. Palaeoenvironmental changes since Pleistocene-Holocene transition: pollen analysis from a wetland in southwestern Patagonia (Argentina). *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2011. 165(1-2): 103-110
- [21] 张金起, 刘斌, 陈旭光等. 新疆艾比湖东南缘 K3 孔晚新生代环境演化[J], *现代地质*, 2009, 23(6): 1012~1021
- [22] 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[J]. *中国科学: D 辑*, 33 (6): 569-575, 2003
- [23] Thompson L G, Yao Tandong, Davis ME, et al. Tropical Climate Instability: The Last Glacial Cycle from a Qinghai-Tibetan Ice Core. *Science*, 1997, 276(20): 1822~1825
- [24] Bond G, Shower W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257~1266, 1997
- [25] Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*, 1997, 25(6): 483~486
- [26] Magny M, Guiot J, Schoellammer P. Quantitative reconstruction of Younger Dryas to Mid-Holocene paleoclimates at Le Locle, Swiss Jura, using pollen and lake-level data. *Quate Res*, 56: 170~180, 2001
- [27] Von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Brauer A, et al. A mind-European Decadal isotope-climate record from 15500 to 5000 years B.P. *Science*, 1992, 7: 187~204
- [28] 阎顺, 穆桂金, 远藤邦彦等. 2500 年来艾比湖的环境演变信息[J], *干旱区地理*, 2003, 26(3): 227~232
- [29] 谢宏琴, 贾国东, 彭平安, 等. 艾比湖二千余年来环境演变的地球化学记录[J]. *干旱区地理* 2005, 28(2): 205-209
- [30] 柏春广, 穆桂金, 王建. 艾比湖湖泊沉积物粒度的分维特征与环境意义[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(4): 336~341
- [31] 苗壮, 穆桂金, 阎顺, 等. 艾比湖 Ash 浅孔沉积信息揭示的环境演变过程[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(4): 367-371
- [32] 郑卓, 潘安定, 罗传秀等. 我国西北新疆地区较大尺度表土孢粉与植被和气候关系研究获得初步成果. *中国古生物学会孢粉学分会简讯*, 第二期, 12, 2006
- [33] 罗传秀, 郑卓, 潘安定等. 新疆地区表土孢粉空间分布规律研究[J]. *地理科学* 2008, 28(2): 272 - 275
- [34] 杨振京, 张芸, 毕志伟, 等. 新疆天山南坡表土花粉的初步研究[J]. *干旱区地理*, 2011, 34 (6): 880-889

- [35] 王开发, 王宪曾. 孢粉学概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1983, 10~20
- [36] 王开发, 徐馨. 第四纪孢粉学[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1988
- [37] 徐馨, 何才华, 王开发,等. 第四纪环境研究方法[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 1992
- [38] 孙湘君. 第四纪花粉学研究方法某些方面的进展. 古生物学研究的新技术新方法, 北京: 科学出版社, 1987, 119-143
- [39] 童国榜, 羊向东, 王苏民, 夏良华. 满洲里一大杨树一带表土孢粉的散布规律及数量特征[J]. 植物学报, 1996, 38(10):814-821
- [40] P D 摩尔、J A 韦布著, 李文漪,等. 欧阳舒校. 花粉分析指南[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1987
- [41] 黄凤宝. 孢子花粉的实验室处理. 中国科学院地质古生物研究所内部书刊, 1980
- [42] 杜乃秋, 陈因硕. 重液浮选对花粉浓度计算的影响[J]. 植物学报, 1990, 32(10): 794-798
- [43] 陈敬安, 万国江, 徐经意, 等. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. 沉积学报, 2000, 9: 18~3, 341~ 343.
- [44] 钱亦兵, 周兴佳, 吴兆宁. 准噶尔盆地沙物质粒度特征研究[J]. 干旱区研究, 2000, 2(17) : 34~41.
- [45] 赵强, 王乃昂, 程弘毅. 青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 干旱区地理, 2003, 1(26) : 1~ 5.
- [46] 李文漪. 中国第四纪植被与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 1~48.
- [47] 沈才明, 唐颌余. 应用聚类分析划分孢粉带(区)的实例[J]. 古生物学报, 1991, 33 (20) : 265-274.
- [48] 孔昭宸, 杜乃秋, 山发寿, 等. 青海湖全新世植被演化及气候变迁——OH85-14c 孔孢粉数值分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10 (3) : 79-88.
- [49] Seppa H, Birks H J B, Odland A et al. A modern pollen-climate calibration set form northern Europe: Developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions . Journal of Biogeography , 2004, 31(2): 251-267.
- [50] Prentice I C. Multidimensional scaling as a research tool in Quaternary palynology. Review of Palaeobotany and Palynology, 1980, 31: 71-104.
- [51] 张文彤. SPSS11.0 统计分析教程[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002. 64-89
- [52] C.J.F. ter Braak, Prentice I C. A theory of gradient analysis in Ecological Research, 1988, 18: 271-317.
- [53] Lu Houyuan, Wu Naiqin, Yang Xiangdong et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environment conditions in Chia I. Quaternary Science Reviews , 2006, 25: 945-959
- [54] Birks H J B, Line J M, Juggins S et al. Diatoms and pH reconstruction. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1990, 327: 263~278
- [55] Birks H J B. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions. In: Maddy D, Brew J S eds. Statistical Modeling of Quaternary Science Data. Quaternary Research Association: Technical Guide 5, 1995. 161~254

- [56] Birks H J B. Numerical tools in palaeolimnology-Progress, potentialities, and problems. *Journal of Paleolimnology*, 1998, 20: 307~332
- [57] C J F ter Braak, Juggins S. Weighted averaging partial least squares regression(WA-PLS): An improved method for reconstructing environment variables from species assemblages. *Hydrobiologia*, 1993, 269/270: 485~502:
- [58] Jongman R H G, ter Braak C J F, Van Tongeren O F R. *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 1~299
- [59] 温瑞林, 肖举乐. 全新世呼伦湖区植被和气候变化的孢粉记录[J]. *第四纪研究*, 2010, 1105~1115
- [60] Hill M O, Gauch H G. Detrended correspondence analysis, an improved ordination technique. *Vegetatio*, 1980, 42: 47~58
- [61] 竺可桢. 中国近 5000 年来气候变迁的初步研究[C]. 见: 竺可桢文集[A]. 北京: 科学出版社, 1979. 475~497.
- [62] 穆桂金, 柏春广. 艾比湖的湖岸地貌及其反映的湖面变化[J]. *干旱区地理*, 1999, 22(1): 34~39.
- [63] 买卖提·依明. 艾比湖第四纪以来的环境变化[J]. *干旱区地理*, 1988, 11(3): 20~24.
- [64] 吴敬禄. 新疆艾比湖全新世沉积特征及古环境演化[J]. *地理科学*, 1995, 15(1): 39~46.
- [65] 苏颖君, 张振海, 包安明. 艾比湖生态环境恶化及防治对策[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(2): 143~148.
- [66] 吉力力·阿不都万里, 穆桂金. 艾比湖干涸湖底尘暴及其灾害分析[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(2): 149~154.
- [67] 施雅风主编. *中国冰川与环境*[M]. 科学出版社, 2000: 361~362.
- [68] 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 585-590
- [69] 陈发虎, 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[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(1): 77~85
- [70] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式—以新疆博斯腾湖记录为例[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 881~887

致 谢

时光荏苒，转眼间，三年的硕士求学时光就要结束了，顿时心中充满无限感激和留恋之情，期间得到了许多老师、同学、朋友和亲人的关心和帮助，论文即将付梓之际，请接受我最诚挚的谢意。

首先，衷心感谢导师杨振京研究员。本论文是在杨老师的精心指导下完成的。从论文选题、样品采集、实验分析到文章撰写都倾注了导师大量的心血。杨老师渊博的知识，严谨的治学态度和精益求精的工作作风无时无刻不在影响着我，使我受益终生。

此外，还要感谢牛树银教授，孙爱群教授，他们无私的帮助与教诲使我受益匪浅；感谢中国科学院植物研究所的孔昭宸研究员，张芸研究员，河北师范大学的许清海教授，李月丛教授，北京大学的王红亚教授和刘鸿雁教授，感谢他们对我三年来在学业上孜孜不倦的教诲。感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所第四纪地质与环境研究室的杨庆华工程师，毕志伟助理研究员，刘林敬助理研究员，孢粉实验室的张会娴实验员、葛彩云实验员等，感谢你们三年来在孢粉实验室分析与鉴定方面给予的大力帮助，感谢郭照霞实验员在数据处理与分析方面的无私帮助，谢谢。

同时感谢葛晓迪、王铮、赵宇安、李斌、牛晓阳在学习和生活中给予的帮助，感谢王田田在数据处理上的帮助，在此表示衷心感谢。

我要把特别的感谢献给我敬爱的父母，你们无私的爱与付出一直激励着我，给我以勇气和信心，是我前进道路上永恒的动力。感谢妻子柴铭浩在家庭中的付出，也感谢你在我学习工作之余带给我的快乐时光，你的爱是我努力工作和奋发向上的源泉。

最后，再一次对三年来指导、关心和帮助我的老师、同学、朋友及家人一并表示最衷心的感谢！

由于本人学识水平有限，对认识深度不够，论文错漏难免，敬请批评指正。

作者简介

赵凯华，男，1988年4月出生，河北任县人，2010年7月毕业于中国地质大学长城学院，地理信息系统专业，获学士学位。2010年9月就读石家庄经济学院，硕士研究生，专业为构造地质学，研究方向第四纪环境与构造地质学。三年期间共修学分43分，其中学位课程平均81分。

攻读硕士学位期间发表的论文和科研成果

1.2010年—2013年主要参加的科研项目：

① 参与导师国家自然科学基金项目《新疆天山中段晚全新世以来气候与植被变化的孢粉学研究》。

② 参加地调项目《黄土堆积区气候变化环境效益调查(G201110)》，负责物探工作以及1:5万专项区域地质调查。

③ 水环所基本科研业务费项目《微结构方法对极端古气候的识别(SK201105)》。

④ 《黄土堆积区气候变化环境效益调查》1:5万专项地质调查。

⑤ 《洛河流域全新世气候时空变化特征(SK201207)》。

⑥ 参与北京大学王红亚教授国家自然科学基金项目《秦岭太白山全新世高山-亚高山环境演变及其与东亚季风动态的关系》，负责表土孢粉样品取样及剖面测制。

⑦ 河北省自然科学基金项目《基于沉积物孢粉分析的安固里淖晚全新世以来的生态环境演变》。

⑧参加《山西隰县地质公园黄土地层N/Q界线研究》项目，负责剖面测制与古地磁取样工作。

⑨ 国家自然科学基金项目《新疆北部典型湿地7000aBP植被演变及环境因素分析》

⑩ 石家庄经济学院重点学生科技项目《模糊逻辑法在张家口南部铅锌银多金属矿床预测中的应用》

2.2010年—2013年公开发表的主要相关论文：

① 《朝不楞第四系湖沼沉积地层孢粉记录与古气候》，会议论文，2011，中国古生物学会孢粉学分会八届二次学术年会，第一作者。

② 《新疆艾丁湖区中全新世以来孢粉记录与古环境》，发表于《第四纪研究》，2013年第33卷，第3期，第一作者。