

中图分类号:           K903          

密级:           公开          

UDC:           900          

学校代码:           10094          

**河北师范大学**

**硕士学位论文**

(学历硕士)

**近 400 年来塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙  
孢粉组合与古气候重建**

**Pollen Assemblages Of Tamarix Cone Sedimentary Veins  
And Paleoclimte Reconstruction In The Southern Margin  
Of Taklimakan Desret During Past About 400 Years**

作者姓名: 郭 峰

指导教师 : 赵元杰 教授

学科专业 : 自然地理学

研究方向 : 环境演变与全球变化

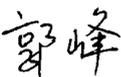
论文开题日期: 2014 年 9 月 18 日



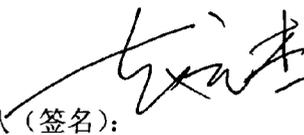
## 学位论文原创性声明

本人所提交的学位论文《近 400 年来塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包孢粉组合与古气候重建》，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的原创性成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中标明。

本声明的法律后果由本人承担。

论文作者（签名）：

2015 年 5 月 28 日

指导教师确认（签名）：

2015 年 5 月 28 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解河北师范大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权河北师范大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书）

论文作者（签名）：

2015 年 5 月 28 日

指导教师（签名）：

2015 年 5 月

## 摘 要

策勒县位于新疆南疆塔克拉玛干沙漠南缘中段(35°17'~39°30' N, 80°03'~82°10' E, 平均海拔1380m), 属于暖温带干旱荒漠气候, 干燥度极高, 可达20.8; 日照时间较长, 春夏多大风, 多干热天气, 沙尘暴频繁, 植被种类组成极其贫乏, 且植被群落类型单调、结构单一。本文通过对策勒县达玛沟地区红柳沙包剖面的孢粉组合特征研究, 利用古气候定量重建方法(WAPLS方法), 重建了研究区近400年来的气候变化过程, 并探讨了植物群落的演替变化。

研究结果显示, 近400年来研究区气候和植被演化经历了3个主要阶段和9个次一级的气候波动。

1590~1810年, 是研究期内历时最长的一次以温暖干旱阶段, 但伴有次一级的冷暖和干湿交替, 其中包括1590~1650年和1731~1794年的偏湿期, 1651~1730年和1795~1810年的偏干期。该阶段形成以蒿属、藜科、禾本科和柽柳科等植物为主的荒漠草原植被。气温为10.5~13.4℃, 平均12.0℃, 降水量为19.7~60.1mm, 平均37.4mm。当时小冰期的低温条件和北大西洋涛动的负异常导致西风带位置南移、强度增强, 使得到达研究区的水汽产生变化, 促使该阶段的干旱时期相对较长。

1811~1945年, 是一个由暖干向冷湿的过渡期, 气候波动较大, 经历了明显的冷湿~冷干~冷湿~暖干的交替过程, 其中1811~1838年和1859~1909年为两个冷湿期, 1839~1858年, 为一个冷干期; 1910~1945年, 是一个偏暖干期。本阶段植被条件有所改善, 形成以柽柳、藜科等植物为主的荒漠灌丛植被, 年平均气温为9.8~13.4℃, 平均10.9℃, 降水量为19.7~83.8mm, 平均54.3mm;

1946~2010年, 气温小幅度下降, 降水量明显增多, 进入一个相对冷湿阶段, 年均温为9.5~12.2℃, 平均10.3℃, 降水量为37.8~98.5mm, 平均68.9mm。植被类型仍以荒漠灌丛为主。孢粉组合中出现大量以大禾本为主的农作物孢粉, 人类活动对研究区气候环境影响逐渐增大。

20世纪30年代以来, 人工绿洲面积迅速扩大, 明显的“绿洲效应”使区域气温小幅度下降, 降水持续增加; 20世纪70年代以后, 降水呈现下降趋势。

关键词: 塔克拉玛干沙漠南缘; 策勒; 红柳沙包; 孢粉; 气候

## Abstract

Cele oasis is located in the middle part of southern margin of Taklimakan Desert (35°17'~39°30' N, 80°03'~82°10' E, ASML 1380m), with a warm temperate arid desert climate, the dry degree is extremely high, can reach 20.8. The Sunshine time is long, strong wind blew heavily there in Spring and Summer with more frequent sandstorms. The vegetation in this region is extremely poor, and the vegetation community types drab, single structure. In this paper, we through the study of *Tamarix* cone section in Cele damagou, with the help of the WAPLS, we reconstruction of the process of climate change research area in the recent 400 years, and analyzes the basic characteristics climate background area evolution and its comparison with regional climate records, discusses the changes in plant communities of the research area.

The research result shows that, in recent 400 years, the climate and vegetation evolution in the study area experienced three stages and nine sub-climate fluctuation:

In 1590~1810, is the longest study period in given priority to with warm and dry, and accompanied by secondary cold warm and dry wet alternation: in the time of 1590~1650 and 1731~1794 is partial wet period, 1651~1730 and 1795~1810 is warm and dry. Pollen type dominated by herbs and shrubs formed the desert-shrub vegetation mainly consisting of *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Gramineae* and *Tamarix*. Quantitative recovery of the temperature is 10.5~13.4°C, average temperature is 12.0°C, precipitation is 19.7~60.1mm, average precipitation is 37.4mm. It is presumed that low temperature conditions during the little ice age and the North Atlantic Oscillation negative anomaly resulted in enhanced westerlies shifts southward strength, make the reach study area water vapor changes, prompted the stage of the relatively long period of drought.

In 1811~1945, it was a transition changing from dry to cold and wet, the climatic fluctuation is obvious, experienced the alternation process obviously a cold and wet ~ cold and dry ~ warm and dry ~ cold and wet, of which 1811~1838 and 1859~1909 for the two stage of the cold wet period, 1839~1858 is the stage of a cold dry period, 1910~1945, is also a warm dry period of the stage. The vegetation in this period is improved; form desert shrub vegetation major of *Tamarix* and *Chenopodiaceae*, the area is expand. the temperature is

9.8~13.4 °C , average temperature is 10.9 °C , precipitation is 19.7~83.8mm , average precipitation is 54.3mm.

In 1946~2010, it is a relatively cold wet stage, the temperature has dropped in small increments, the precipitation increased obviously, the temperature is 9.5~12.2°C, average temperature is 10.3°C, precipitation is 37.8~98.5mm, average precipitation is 68.9mm. The vegetation types are mainly desert shrub, the area is further expand.

There are a large number of crop pollens marked with big grain, which indicted human activities influence had increased gradually.

Since the 1930s, regional temperature fallen slightly due to the expansion of artificial oasis in this area, formed the obvious "oasis effect" ; since the 1970s, precipitation presents a downward trend in the study area, we think that is because in the basin, middle reaches the increase of water consumption, agriculture, industry, life caused by underground water level downstream continues to decline, soil water shortage, water plant growth condition deteriorated.

**Key words:** Southern margin of Taklimakan Desert, Cele, Tamarix cone, pollen, Climat

# 目 录

摘 要.....	V
ABSTRACT.....	VII
一 前 言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 红柳与红柳沙包.....	1
1.2.1 红柳.....	1
1.2.2 红柳沙包.....	2
1.2.3 红柳沙包沉积纹层.....	3
1.3 红柳沙包沉积纹层的研究进展.....	3
1.3.1 红柳沙包沉积纹层计年.....	3
1.3.2 红柳沙包的气候环境信息记录.....	4
1.4 孢粉学与气候的关系.....	4
1.5 研究思路与目的.....	5
1.6 技术路线.....	6
1.7 研究意义.....	6
1.8 课题来源.....	7
二 研究区概况.....	8
2.1 地理位置.....	8
2.2 气候.....	8
2.3 水文.....	9
2.4 植被.....	9
三 样品采集与沉积纹层年代序列.....	10
3.1 样品采集.....	10
3.2 纹层年代序列建立.....	11
3.2.1 $^{210}\text{Pb}$ 测年.....	11
3.2.2 $^{137}\text{Cs}$ 测年法.....	12
3.2.3 $^{14}\text{C}$ 测年法.....	13
四 实验方法与孢粉分析.....	15
4.1 孢粉实验处理.....	15
4.2 孢粉鉴定统计.....	15
4.3 孢粉组合特征.....	16
4.3.1 孢粉带 I.....	17
4.3.2 孢粉带 II.....	18
4.3.3 孢粉带 III.....	18
五 古气候的定量重建.....	20
5.1 WAPLS 法进行古气候定量重建.....	20
5.2 古气候定量重建结果.....	21

六 讨 论.....	23
七 结 论.....	26
参 考 文 献.....	27
致 谢.....	33
攻读学位期间取得的科研成果清单.....	34

# 一 前 言

## 1.1 研究背景

近百年以来,受到全球气候变化和人类活动的双重影响,荒漠化已经成为目前世界上最严重的生态环境问题之一,它不仅对全球气候变化具有一定的反馈作用,同时也威胁到人类自身的生存和发展<sup>[1-3]</sup>。因此,认识干旱区生态环境的时空的演变规律,以及对人类活动的影响,是实现区域社会经济与环境可持续发展的科学基础<sup>[4]</sup>。

诸多研究显示,在全球气候变暖的大背景下,气候变化在不同的区域具有不同的表现,地域性特征较为显著<sup>[5-7]</sup>。因此,正确的认识区域气候变化,进而估计和揭示全球变暖的原因与趋势,对掌握全球气候变化规律至关重要。塔克拉玛干沙漠是我国乃至世界上典型的极端干旱区之一<sup>[8]</sup>,气候变化是该地区气候干湿波动和沙漠范围空间迁移的主要自然驱动因素<sup>[9]</sup>。策勒绿洲位于塔克拉玛干沙漠南缘与昆仑山北麓之间,属荒漠~绿洲型生态系统<sup>[10]</sup>,生态环境极其脆弱<sup>[11]</sup>。其气候环境演化过程不仅对青藏高原隆升响应敏感,同时也是塔克拉玛干沙漠演化过程的反映<sup>[12-14]</sup>。近年来,关于该区域的气候环境变化取得了重要成果<sup>[15-17]</sup>,但前人的研究主要关注长时间尺度的气候环境演化,且分辨率普遍不高,对短时间尺度环境演化过程及与人类活动关系研究相对薄弱<sup>[18-19]</sup>。制约该区域高精度、高分辨率古气候环境研究的关键在于缺乏合适的古气候环境信息载体。

## 1.2 红柳与红柳沙包

### 1.2.1 红柳

红柳,即中国怪柳(*Tamarix chinensis*),又名河西柳,属怪柳科怪柳属植物。其生长环境一般为流沙地、固定沙地、不同程度的盐渍化土地、砾石戈壁等环境较为恶劣的地区<sup>[20]</sup>。在我国,红柳生长区域主要有柴达木盆地、河西走廊、新疆的三大盆地、内蒙古的沙漠等地区,其中以新疆的三大盆地中红柳的品种最多,可以达到全国红柳总种数的84%,特别是新疆南部地区,红柳的种类更多<sup>[21]</sup>。

红柳是一种典型荒漠区的盐生植物,它具备了能够适应干旱区盐碱土壤的基本特征:(1)红柳是一种根系发达的植物,且根系生长很深,直根可深入地下多达10余米,而且红柳的毛细管组织相当发达,能够汲取埋藏较深的地下水,并且能够从水分不饱和

的土壤中获取自身生长需要的水分<sup>[22]</sup>。同时，红柳不定根具有很强的生长能力，当被流沙掩埋时，它可以从根颈处生长出大量纤细的不定根，枝条亦迅速向上生长，生成新的枝条；(2) 红柳叶呈鳞片状，能够使枝叶的蒸腾面积明显降低，减少水分大量的丧失，而且鳞片状树叶抗热耐寒，在绝对最高气温达 47℃的地区，最低气温达-40℃的恶劣条件下仍能正常生长；(3) 红柳茎杆中生长有细长的植物纤维，能够确保其茎杆具有很好的柔韧性，保证了生长在气候环境条件较为恶劣地区红柳的茎杆不被大风吹折或遭风沙吹割而断裂；(4) 红柳本身具有一定的泌盐功能，即可以通过体内的泌盐腺排出体内积累的多余盐分，以适应在高盐分土壤环境下的生长需要<sup>[23]</sup>。总体来讲，红柳经过大自然长期的适应，具有了即抗旱又耐盐抗风沙的生长能力，能够在干旱区正常生长。

### 1.2.2 红柳沙包

红柳沙包是在干旱区各类植物沙丘中最具代表性的沙丘之一。整体形态为凸起的沙包状，其顶部为圆形，迎风坡常年被风沙所侵蚀，坡度较陡，背风坡为风沙沉积的区域，经长时间沉积，坡度较缓<sup>[24]</sup>。一般而言，红柳的生长年份决定了红柳沙包的高度，红柳沙包的高度一般为 3~10 米，高者可达 15 米左右。

红柳沙包的形成,主要是红柳和风沙的互为作用的结果。其形成过程可以描述为：春季和夏季是红柳迅速生长的时期，在风沙盛行时，红柳的枝叶能够将在风沙流中扬起的沙粒拦截或阻挡下来，迫使沙粒降落和沉积，在红柳的根部形成沙堆层；秋季和冬季是红柳的枯萎期和衰败期，其枯枝落叶飘落在根部堆积的沙堆上，经过冬季霜雪的压盖，形成枯枝落叶层。这样，日复一日、年复一年经过长期的交替堆积和掩埋，便使红柳沙堆的体积慢慢增大，逐渐形成了体积较大红柳沙包（图 1）。但是，红柳沙包的体积并不是无限制增长的，当地下水下降到一定深度，或者因红柳沙包达到一定的高度而致使红柳的根部无法汲取足够的水分来保障自身生长的需要时，红柳沙包就不再生长，最后会因风沙的吹蚀而消亡<sup>[25]</sup>。

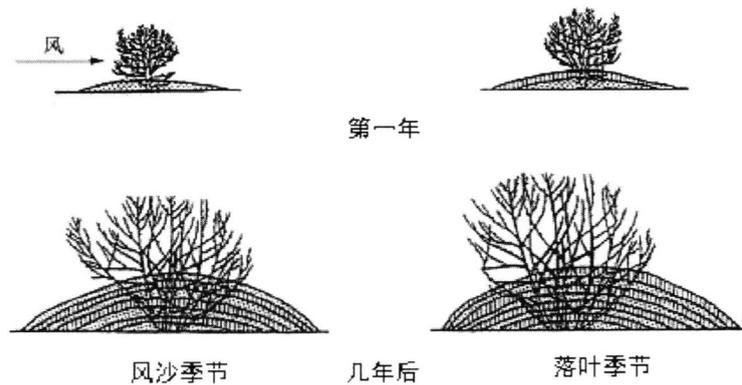


图1 红柳沙包沉积纹层形成示意图

Fig.1 The schematic formation of *Tamarix* cone sedimentary laminae

### 1.2.3 红柳沙包沉积纹层

红柳沙包的沉积纹层（即“年层”），是红柳沙包生长的物质与信息的载体。“年层”中沉积沙层的厚度主要是由红柳生长当年沙尘暴发生的次数以及当年盛行风的风力强度决定的；沉积纹层中枯枝落叶的厚度，受当年红柳枝叶的生长茂密程度和周围地区所存在的生物生物量的影响，生物量大，枯枝落叶层厚，反之则较薄。因此，红柳沙包的沉积纹层便如同季候泥、树轮一样，是一种储存区域环境信息和计年的有效载体<sup>[26]</sup>。

## 1.3 红柳沙包沉积纹层的研究进展

红柳沙包的沉积纹层不仅是适合干旱区的一种高分辨计年手段，它的沙层和枯枝落叶层更是古环境和古气候的有效信息载体，能用来研究区域古气候与古环境的变化<sup>[27]</sup>。但是，在某些区域，只以红柳沙包计年会存在一定的不足，如：风沙活动比较强烈、洪水次数发生较为频繁的地区，或者人为因素影响较大的区域，容易使红柳沙包年层的连续性遭到一定程度的破坏，出现年层缺失或者年层模糊不清等状况。为了确保红柳沙包计年的准确性和连续性，在这些区域进行测年时需要借助其他测年手段进行相互补充，以提高测年的准确性。

### 1.3.1 红柳沙包沉积纹层计年

红柳沙包沉积纹层主要是由沙粒和红柳枯枝落叶两种物质相互叠加而成，它的形态就如同树木年轮、湖相纹泥一般，构造层理较为清晰，属于高分辨率的计年物质，可达年级。夏训诚、赵元杰等<sup>[28]</sup>将从红柳沙包沉积纹层中直接计数的计年结果分别与<sup>14</sup>C测

年结果、考古资料辅助测年等结果相对比发现，利用红柳沙包纹层直接统计的年代结果（即纹层计年法）与其它测年手段所测定的年代非常接近，这为利用红柳沙包沉积纹层作为一种直接计年工具奠定了良好的基础。2004年，红柳沙包的沉积纹层计年法正式作为一种新颖的测年方法公布出来，得到了广泛的关注；2004年以后，伴随着研究的深入和准确度的提高，考虑到红柳沙包是形成于风沙活动较为强烈的荒漠地区，因此在利用红柳沙包沉积纹层来计年的过程中，还应注意其沉积纹层是否连续，即是否存在沉积层缺失、纹层破坏等现象<sup>[29]</sup>。因此，在红柳沙包纹层保存较好、纹层清晰的区域可以利用纹层直接计年，但是在纹层较为模糊，红柳沙包遭到一定程度破坏的地区，在参考红柳沙包沉积纹层计年的同时，还应用到<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb、<sup>14</sup>C、光释光等其它测年方法，进行补充。

### 1.3.2 红柳沙包的气候环境信息记录

红柳沙包的组成部分主要由两种：枯枝落叶和风成沙。它们都是区域环境信息的载体，能够将当时红柳生长的气候环境信息记录下来。在红柳沙包沉积纹层中所包含的沙物质研究中，沙粒的平均粒径是反应红柳生长区域风沙活动强度的重要古气候代用指标，分选系数代表沉积物的分选性程度的高低，中值粒径指示沉积动力的强弱，沙包的厚度能够间接反映当时下垫面干湿的状况，沙粒的粒级分布曲线和概率累计曲线也可用于分析风沙沉积动力环境是否一致<sup>[28]</sup>。

沙物质的粒度和其中携带的植物孢粉，以及红柳枯枝落叶中所含氢氧同位素、阳离子有机碳氮、稳定碳同位素等参数也记录了红柳生长区域气候与环境的变化信息，为定量恢复干旱区的古气候环境变化提供了一种高分辨率新的代用指标。2010年，王筠等<sup>[30]</sup>通过对红柳沙包中所含的孢粉组合特征研究，利用WAPLS分析模型和相关性分析法定量恢复了罗布泊地区近200年来的年均温序列、7月均温序列、1月平均相对湿度序列，结果显示：1839~1886年是研究区的气候由冷干转向暖干；1891~1941年研究区气候波动较大，经历了一次由冷湿向冷干，再由冷干转向暖干的转变；1946~2004年研究区气候由暖干转向暖湿；2011年，赵元杰、王晓毅等<sup>[31]</sup>通过分析罗布泊地区红柳沙包沉积纹层中所包含的稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的研究，指出红柳落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值受到多个气候要素的综合影响，并通过转换函数定量恢复重建了1839~2006年罗布泊地区的年平均气温、8~10月空气相对湿度、4~5月平均风速；2012年，沈睿媛、李秀丽等<sup>[32]</sup>研究发现红柳沙包的枯枝落叶中所包含的 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等阳离子含量的变化与当地气温变化成正相关关系，阳离子含量的变化与地下水位和罗布泊湖泊的水域面积也存在一定相关

性；2013年，刘倩、高辰晶等<sup>[15]</sup>在红柳落叶中所包含的阳离子分析的基础上，划分出了塔克拉玛干沙漠南缘近400年来的气温经历了一次由暖变冷，再由冷变暖的变化过程，即：1590年~1691年和1897年~2010年的暖期，1692年~1896年的冷期，并指出研究区再经历冷暖变化时伴有次一级的气候波动事件；同时，也证明了红柳沙包红柳落叶中的阳离子含量变化与极端气候事件，如洪水发生年等，也存在一定的对应关系。另外，赵娟等<sup>[33]</sup>利用罗布泊红柳沙包所含信息研究极端气候事件和影响因素、汪骏鸿等<sup>[34]</sup>对罗布泊地区红柳沙包氢氧同位素的研究等，都充分证明了红柳沙包沉积纹层可以作为一种高分辨率的代用指标来分析干旱区环境变化。

#### 1.4 孢粉学与气候的关系

现代花粉数据库及其与气候因子之间的相互关系是利用化石花粉进行气候重建的基础，直接影响定量气候重建结果的准确性<sup>[35]</sup>。近年来，随着全球植被和气候数据库不断完善、现代孢粉数据的逐渐积累和补充，建立了大量的综合现代孢粉数据库，如：欧洲孢粉数据库、北美孢粉数据库（<http://www.ncdc.noaa.gov>）、东亚孢粉数据库（<http://eapd.sysu.edu.cn/>）等；定量重建气候指标也在原来温度、降水的基础上，增加了相对湿度、干燥度、蒸发量等，进一步提高了利用孢粉资料定量重建古气候环境的可靠性和实用性。

自20世纪80年代以来，中国展开了一系列关于花粉和气候定量关系的研究，并广泛应用于古气候定量重建中，如：冯晓华、阎顺等<sup>[36]</sup>，运用生物群区划定量技术（Biomisation）、全球植物功能分类系统（PFTS）以及600个地层孢粉样品，重建了我国新疆地区全新世以来14个时段的生物群区以及全新世新疆地区的气候变化规律；温锐林、肖举乐等<sup>[37]</sup>，利用内蒙古呼伦湖HL06岩芯沉积的孢粉组合，恢复了全新世呼伦湖区域植被的演变过程，并根据我国北方和蒙古表土孢粉数据和气象资料，建立了孢粉~气候参数转换函数，定量重建了呼伦湖区的降水和气温的变化；邓韞和郑卓<sup>[38]</sup>，在中国东部连续的尘土孢粉样基础上，用转换函数的方法研究中国东部孢粉与气候要素的定量关系，并指出某些草本植物花粉之间的含量变化很大程度上与太阳辐射量有关，使定量重建古植被带的迁移及古气候的变化成为可能。

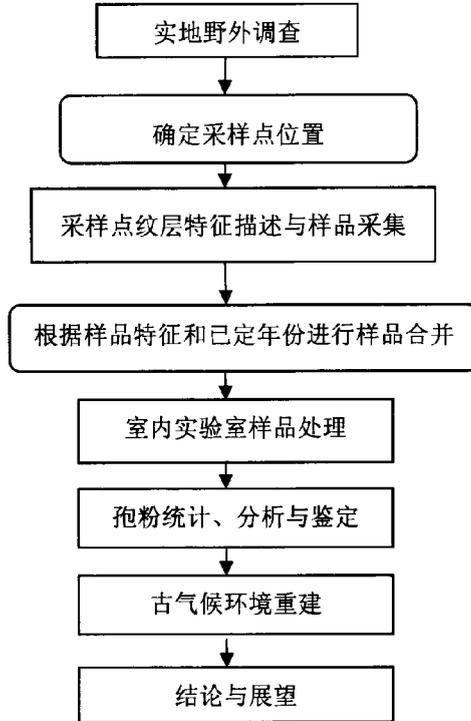
#### 1.5 研究思路与目的

本文试图通过对新疆南疆策勒绿洲达玛沟地区红柳沙包剖面的孢粉分析，获得该地区近400年来孢粉组合变化的基本特征，进而推断该区域气候环境演化的基本过程，为

该地区生态环境演化和生态恢复提供基础数据，同时为研究塔南地区气候变化，预测未来气候发展方向提供依据。

## 1.6 技术路线

本文的技术操作主要有野外工作和室内工作。具体技术路线如下：



## 1.7 研究意义

(1) 使红柳沙包沉积纹层作为干旱区分辨率达年际的计年手段得到进一步验证与完善。

(2) 研究红柳沙包沉积纹层孢粉组合与研究区气温和降水之间的关系。

(3) 利用红柳落叶孢粉组合进行古植被的反演，揭示过近 400 年来研究区植被类型的演变过程。

(4) 将研究区的区域气候变化与全球气候变化相结合，使其能够成为研究尺度在百年的全球气候变化例证区。

## 1.8 课题来源

本选题来源为 NSFC—新疆联合基金项目（项目批准号：U1303285，项目执行期 2014~2017）、国家自然科学基金项目（项目批准号：41071133，项目执行期 2010~2013）和河北省重点学科自然地理学建设项目。

## 二 研究区概况

### 2.1 地理位置

该研究区位于新疆南疆塔克拉玛干沙漠南缘中段（35°17'~39°30' N，80°03'~82°10' E，平均海拔 1380m）策勒县（图 2）。县境东西宽 35.1~120.9 公里，南北长 247.7 公里，总面积 3.31 万平方公里，东与于田县相邻，南与西藏自治区接壤，西接洛浦、和田县，北至塔里木盆地中心与阿克苏地区相连；其中，山区面积占 40.5%，戈壁、沙漠面积占 56.6%，冲积平原面积占 2.9%，人口密度 3.6 人/平方公里（策勒县志）。

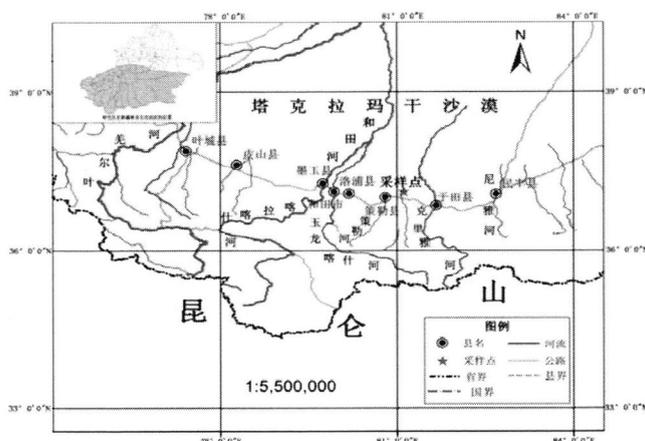


图 2 地理位置与采样点位置示意图

Fig.2 Sketch map of geographical location and the sampling site

### 2.2 气候

研究区位于亚欧大陆腹地，远离海洋，气候类型为典型的大陆性干旱气候，年平均降水量只有 35.1 mm，而年平均蒸发量可达 2595.3 mm，干燥度极高，干旱系数可达 20.8；年平均气温 11.9℃， $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温在 4200℃~4340℃ 之间，日照时间较长，年均日照时数可达 2697.5 h，无霜期 209 天，霜期大约始于 10 月 15 日左右，终止于来年 3 月 20 日左右。春夏多大风、干热天气，沙暴发生次数比较频繁<sup>[39]</sup>。主要自然灾害有寒流、干旱、霜冻、大风、冻害等，局部地区有冰雹、病虫害。春季干旱缺水。干热风灾害频繁。其中干热风和霜冻对农作物生长的影响最大（策勒县志）。

## 2.3 水文

研究区南部为昆仑山脉，为研究区内河流发源地。主要河流有策勒河、奴尔河、乌鲁克萨依沙、萨依巴格河、布藏河、喀拉苏河、阿克萨依河、卡拉苏河、玉龙河、恰哈河 9 条季节性河流，河流的补给水源主要依靠降雨、积雪融水和冰川融水。这些河流的年径流总量约 6 亿立方米。夏季水量大，春季枯水期断流。泉水沟有 7 条，年径流总量 1.03 亿立方米。境内河流、泉水水量虽然可观，但由于蒸发和流经戈壁时的渗漏损失，利用率很低，其中河流水利用率 30%，泉水利用率 40%（策勒县志）。

## 2.4 植被

研究区内植被种类组成极其贫乏，且植被群落类型单调、结构单一。乔木类主要有胡杨（*Populus euphratica*）和少量灰杨（*P. pruinosa*）；灌木类主要有多枝怪柳（*Tamarix ramosissima*）和密花怪柳（*T. arcanhoides*）等；小灌木类主要有塔里木沙拐枣（*Calligonum caputmedusae*）、膜果麻黄（*Ephedra przewalskii*）、琵琶柴（*Reaumuria songarica*）等。多年生草本植物主要有骆驼刺（*Alhagi sparsifolia*）、碱蓬（*Suaeda salsa*）、花花柴（*Karelinia caspica*）等<sup>[40]</sup>。

## 三 样品采集与沉积纹层年代序列

### 3.1 样品采集

项目组于 2011 年 6 月 18~20 日, 在新疆策勒县达玛沟地区进行实地考察和分析, 选定了典型的且具有清晰沉积纹层的红柳沙包, 进行样品采集工作。通过 GPS 卫星定位采样点的坐标为 37.09°N, 81.08°E, 海拔 1318m a.s.l, 剖面深度约 4.5 m (图 2)。

按照赵元杰等提供的采样方法<sup>[41]</sup>, 采集样品时先对红柳沙包剖面进行清理和固定, 首先按照红柳沙包沉积纹层的层理由顶层至底部逐层计数并进行标记, 然后将红柳沙包沉积纹层的最上层作为第一层, 再按照固定好的纹层和顺序由上而下依次进行样品采集。样品采集的具体操作步骤如下:

- (1) 用手持 GPS 定位仪测定采样点所在的精确地理位置和海拔高度;
- (2) 修饰红柳沙包剖面。用平头铲自上而下去除红柳沙包表面的浮土, 使红柳沙包的沉积纹层能够清晰的显示出来;
- (3) 测量清理的纵剖面的高度, 做好详细记录;
- (4) 对取样剖面进行整理, 用装有纯净水的喷壶将剖面喷湿;
- (5) 仔细辨认剖面的沉积纹层结构, 并用竹签对各纹层加以固定、标记;
- (6) 用标尺测量所标记好的每层纹理的沉积厚度以及样品采样厚度, 并做好详细记录;
- (7) 按照已确定的剖面沉积纹层进行样品采集, 按照从上到下的顺序, 用小型扁平铲进行逐层采集, 采集后放入不锈钢托盘中, 样品采集不少于 200g; 对沉积纹层模糊的层段, 按平均厚度取样, 并详细记录样品采集的深度。
- (8) 将采集的纹层样品装入样品袋, 密封并按顺序编号。

在该样点共采集样品 151 个 (表 1), 并详细记录了采样点周围的地形、植被等相关信息。

表 1 各层段样品的采集方法

Table.1 Sampling method between different Tamarix cone sedimentary veins

样品编号	样品深度	采样方法
C1~C33	0~72.4cm	按平均厚度 2.2cm
C34~C42	72.4~93.0cm	按平均厚度 2.3cm
C43~C85	93.0~118.0cm	按纹层实际厚度
C86~C97	118.0~143.2cm	按平均厚度 2.1cm
C98~C126	143.2~208.0cm	按平均厚度 2.2cm
C127~C141	208.0~250.0cm	按平均厚度 2.8cm
C142~C151	250.0~450.0cm	按平均厚度 20cm

### 3.2 纹层年代序列建立

红柳沙包年层法是利用其发育的沉积纹层计年，是一种绝对的且较为准确的计年手段<sup>[42]</sup>，且可以通过一定的实验手段提取沉积纹层中所包含的气候环境信息<sup>[27]</sup>。

采样点红柳沙包的沉积纹层一部分较为清晰，能够准确判断其纹层为连续的年层；但有些纹层由于受到洪水等其他自然因素的破坏，纹层构造较为模糊，不能确定沙包的沉积纹层是否连续。所以，在对该样点进行年代测定时需要借助其他测年手段进行辅助，使得年代序列的建立更为准确、可信。

#### 3.2.1 $^{210}\text{Pb}$ 测年

$^{210}\text{Pb}$  测年法是以大气中的天然放射性铀系的一个子成员，即由  $^{226}\text{Ra}$  衰变而形成的中间产物  $^{222}\text{Rn}$ ，经其衰变而散落，并蓄积在沉积物中的一种非平衡态。 $^{210}\text{Pb}$  测年法主要应用于沉积物的年龄测定和沉积速率研究，如：冰川、湖泊、积雪、陆架、陆坡和海洋沉积物等<sup>[43-49]</sup>。该测年技术于 20 世纪 60 年代由美国科学家 Goldberg E. D. 首先提出<sup>[50]</sup>，最早应用于对南极冰雪的年龄范围的测定<sup>[51]</sup>，由此  $^{210}\text{Pb}$  测年便广泛开展起来。在随后的发展中，由于物理测量方法和化学分析的逐步成熟， $^{210}\text{Pb}$  测年法日趋完善，目前它已经成为最可靠的近百年左右的测年方法之一。这对于海洋资源开发、海洋生物学、海洋地质以及沿海海洋工程建设都有重大的意义。目前， $^{210}\text{Pb}$  测年法已在我国得到广泛应用，并取得了一定的成果<sup>[52-55]</sup>。样点  $^{210}\text{Pb}$  比活度垂直剖面测定结果(见图 3)：

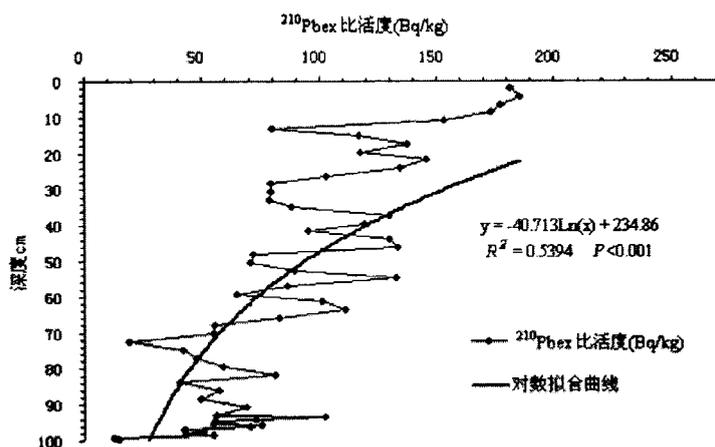


图3 策勒达玛沟地区采样点红柳沙包  $^{210}\text{Pbex}$  比活度垂直剖面图

Fig.3 Cele Damagou area sampling point of *Tamarix* cone specific activity of  $^{210}\text{Pbex}$  vertical profile

### 3.2.2 $^{137}\text{Cs}$ 测年法

$^{137}\text{Cs}$  是经核爆炸后产生的一种放射性物质，可以通过大气的扩散传播，沉降到地表形成放射性核素。在年代测定中，可以利用沉积物中  $^{137}\text{Cs}$  的垂直剖面峰值作为参考时间段，再根据不同地区进行核试验的高峰期与  $^{137}\text{Cs}$  在沉积物中的峰值分布进行对比，确定峰位所处的年代，以得到该时段内研究区域沉积物的平均沉积速率和年龄 [56]。塔克拉玛干沙漠是我国面积最大的沙漠，距离我国的罗布泊核试验爆炸基地较近。1964年，我国第一颗原子弹在罗布泊区域爆炸成功，爆炸量相当于2万吨；1980年我国第二次进行大气核爆炸，爆炸量较上一次明显扩大，约20万吨，对采样点区域的影响较为显著。因此，研究采用1964年和1980年作为两个时间标志，与成绩纹层中的  $^{137}\text{Cs}$  峰值进行对应，得出以下结果（图4）：

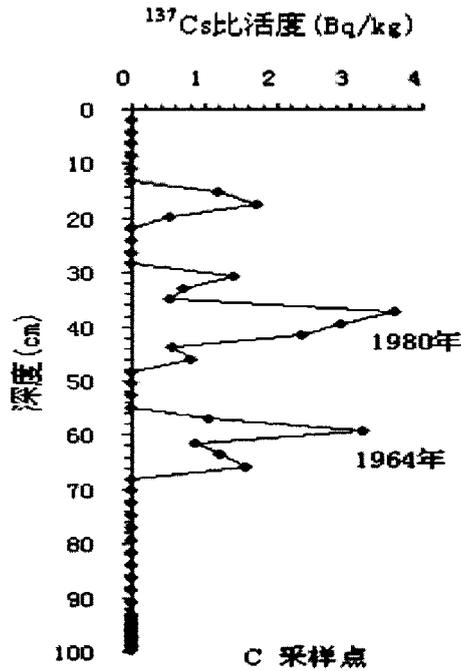


图 4 策勒达玛沟地区采样点红柳沙包  $^{137}\text{Cs}$  峰值比活度垂直剖面图

Fig.4 Cele Damagou area sampling point of *Tamarix* cone peak specific activity  $^{137}\text{Cs}$  vertical profile

### 3.2.3 $^{14}\text{C}$ 测年法

$^{14}\text{C}$  加速器质谱分析法 (以下简称 AMS  $^{14}\text{C}$ ) 是同位素年龄测定方法之一, 具有比较完整的理论基础和现代物理测试技术, 可以用来精确的测定 6 万年以内含碳标本的年龄<sup>[57]</sup>。随着实验方法和科学技术的发展, AMS  $^{14}\text{C}$  的测量精度已达到一个相当高的水平, 目前已经可以将统计误差缩小到千分之几, 对于 1 万年以内的标本, 可以将误差可缩小至几十年, 以成为目前较为成熟和可信的测年方法之一。

为确保所测年代的准确性, 我们选取样点最底层样品 (即 450mm 处), 做 AMS  $^{14}\text{C}$  测定, 其结果 (图 5) 显示:

样点	样品	深度	出土地点	碳十四年代 (a BP)	误差
C 采样点	红柳	450 cm	新疆哈密县达玛沟乡	360	30

注：所用碳十四半衰期为 5568 年，BP 为距 1950 年的年代。

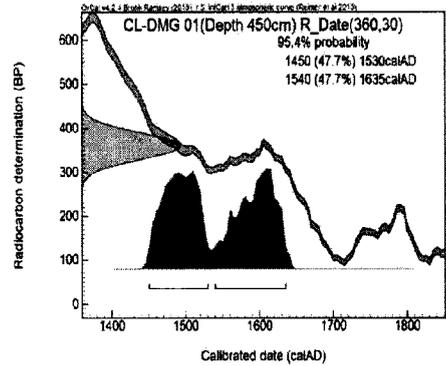


图 5 AMS <sup>14</sup>C 测年结果及年代矫正

Fig.5 Correction of AMS<sup>14</sup>C dating results and age

选取 <sup>14</sup>C 加速器质谱分析法，测定剖面底层样品（-450cm）的年代，并利用校正程序 Oxcal v4.2.4 Online，校正数据集 IntCal 13 (Bronk R C, 2009.) 进行校正，确定其年代距 1950 年为 360±30a。依据矫正结果，将底层样品确定为 1590 年，结合纹层计年、<sup>137</sup>Cs 和 <sup>210</sup>Pb 的峰值年代，以及 <sup>210</sup>Pb 的年沉积速率进一步矫正，最终建立采样点红柳沙包沉积纹层的年代序列<sup>[58]</sup>（图 6），结果显示：达玛沟红柳沙包剖面所记录的年代为公元 1590 至 2010 年，共 421 年。其中，沉积纹层中沙物质的 <sup>210</sup>Pb 和 <sup>137</sup>Cs 的年代数据由中国科学院南京地理湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室测定；标志纹层有机质的 AMS <sup>14</sup>C 测年由北京大学加速器质谱实验室测定。

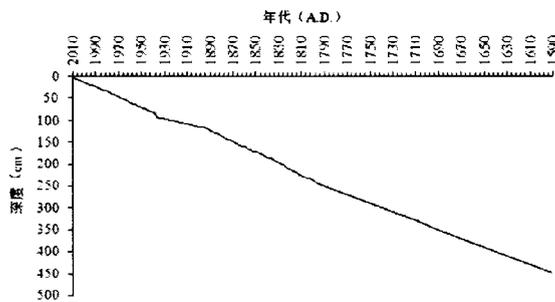


图 6 达玛沟剖面沉积纹层年代序列

Fig.6 Age sequence of Tamarix cone sedimentary veins at Damagou

## 四 实验方法与孢粉分析

### 4.1 孢粉实验处理

对采集的样品进行孢粉提取，采用方法为常规的 HCl-NaOH-HF 处理法<sup>[59]</sup>，具体步骤如下：

(1) 烘干样品。用烘箱将采集的沙土样品烘干，温度设置为 85℃，烘干 12 小时。

(2) 样品称重。采用电子天平称取适量样品，取样品量 30g，放入容量为 500 ml 的烧杯中。

(3) 酸处理。在每个样品中加入 36% HCL 溶液 150 ml 去除样品中所包含的碳酸盐类，水浴加热 10 min，待其充分反应后，加清水离心 10 min（转速 3000 r/min），洗至中性（一般 4-5 次）。

(4) 碱处理。每个样品加入 10% NaOH 溶液 150 ml 去除样品中含有的腐殖质以及其他胶体物质，水浴加热 10 min，待其充分反应后，加清水离心 10min（转速 3000 r/min），洗至中性（一般 4-5 次）。

(5) 氢氟酸处理。每个样品加入 40% HF 溶液 210 ml 去除样品中含有的二氧化硅和硅化物，使其静置反应 72 h（视样品中石英含量而定），待其反应彻底后，加清水离心 10 min（转速 3000 r/min），洗至中性（一般 5-6 次）。

(6) 筛选处理。将洗至中性的样品导入孔径为 200 μm 的耐酸筛网中进行筛滤，去除大于 200 μm 的杂质，将筛选好的样品再次导入孔径为 10 μm 的耐酸筛网中进行筛滤，采用超声波清洗器振荡筛选，而后回收筛布上的残留物 (>10 μm)，导入至 10 ml 塑料试管中。

(7) 醋酸酐分解处理。在处理好的每个样品中加入 1:9 的浓硫—酸醋酸酐溶液 3 ml，水浴加热 3 min，待其充分反应后，加清水离心，洗至中性（一般 4-5 次）。

(8) 保存制片。将样品离心后，使用 95%酒精溶液离心脱水，然后加入甘油保存并制片。

### 4.2 孢粉鉴定统计

孢粉鉴定统计在 Carl Zeiss AX10 光学生物显微镜下进行，将孢粉玻片放大倍数至 400 倍，每个样品鉴定统计孢粉数量在 400 粒以上，部分样品花粉含量较低，统计花粉 200 粒以上。孢粉鉴定主要参考《中国植物花粉形态》<sup>[60]</sup>和河北师范大学环境考古实验

室保存的现代孢粉样品。并根据需要对统计结果进行制图操作，孢粉图谱由 Tilia 1.7.16 软件完成，并用有序聚类分析对孢粉百分比数据分带<sup>[61]</sup>。

### 4.3 孢粉组合特征

达玛沟红柳沙包剖面 55 个孢粉样品共鉴定出 40 个科属的植物孢粉类型，其中乔木植物类型 9 个、灌木植物类型 13 个、草本植物类型 18 个。乔木花粉类型主要包括松属 (*Pinus*)、柳属 (*Salix*)、胡桃属 (*Juglans*) 等；灌木花粉类型主要有怪柳属 (*Tamarix*)、霸王属 (*Sarcozygium*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、胡颓子科 (*Elaeagnaceae*) 等；草本植物花粉类型以蒿属 (*Artemisia*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、禾本科 (*Gramineae*)、菊科 (*Asteraceae*) 为主。蕨类孢子和水生植物含量均较低。使用 CONISS 软件对孢粉百分比和孢粉浓度比数据进行有序的聚类分析，可将达玛沟红柳沙包剖面孢粉谱划分为 3 个主带和 6 个亚带 (图 7)，孢粉浓度比图 (图 8)。

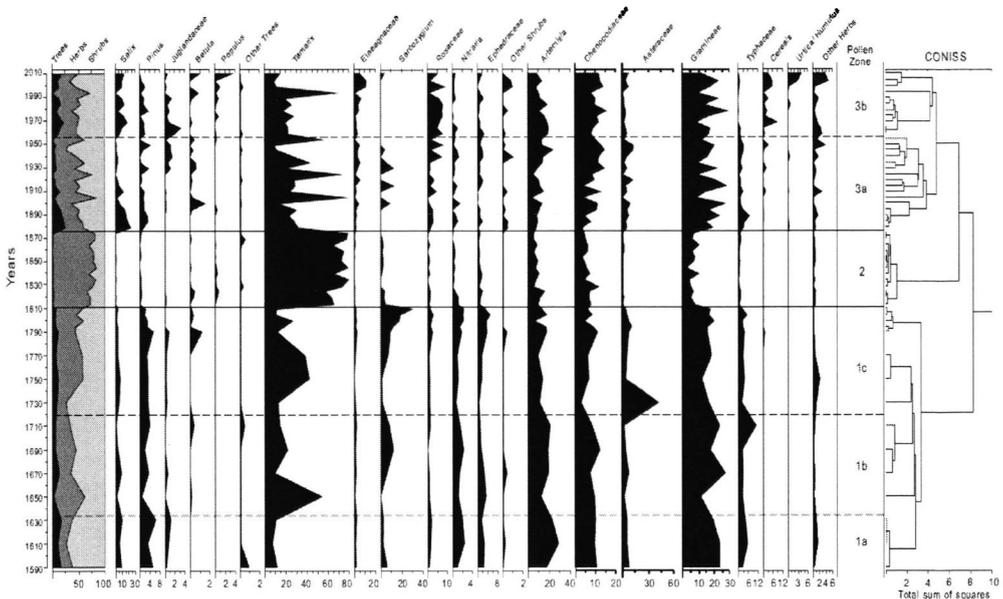


图 7 达玛沟红柳沙包近 400 年以来孢粉百分比图

Fig.7 Pollen percentage in Tamarix cone sedimentary veins at Damagou during the past about 400 years

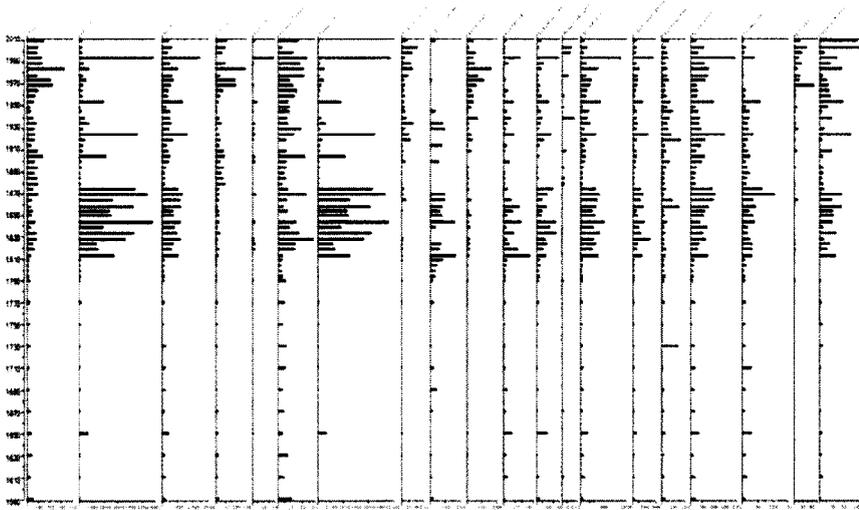


图 8 达玛沟红柳沙包近 400 年以来孢粉浓度 (粒/g)

Fig.8 Pollen concentration in Tamarix cone sedimentary veins at Damagou during the past about 400 years

#### 4.3.1 孢粉带 I (450~226cm, 1590~1810 年)

本带乔木花粉含量较低 (2.63%~17.29%, 平均 8.9%), 以松属和柳属为主。草本花粉占据优势 (16.2%~74.26%, 平均 55.9%), 其中以蒿属 (6.4%~29.2%, 平均 16.8%)、禾本科 (11.3%~27.3%, 平均 18.5%)、藜科 (2.8%~12.4%, 平均 8.2%) 和菊科 (2.2%~40.1%, 平均 8.1%) 为主。灌木花粉约占 35.2% (16.2%~59.0%), 以桤柳属 (6.8%~53.8%, 平均 19.9%)、霸王属 (0.9%~29.9%, 平均 8.9%) 为主。含有少量水生植物花粉, 主要为香蒲属 (2.1%~10.9%, 平均 3.7%)。根据孢粉组合变化, 孢粉带 I 可分为 I a、I b、和 I c 等三个亚带。

I a 带 (450cm~400cm, 1590~1635 年): 该亚带乔木花粉含量 (14.3%) 相对较少, 花粉组合以草本 (66.2%) 和灌木 (19.5%) 花粉为主; 桤柳属 (6.8%~11.2%, 平均 9.5%) 和霸王属 (2.1%~5.6%, 平均 3.4%) 是主要灌木花粉类型; 草本花粉以蒿属 (18.1%~29.2%, 平均 23.4%)、藜科 (9.4%~10.7%, 平均 10.1%)、菊科 (5.1%~7.4%, 平均 5.9%) 和禾本科 (19.5%~23.5%, 平均 22.1%) 为主; 湿生植物中香蒲属 (2.3%~4.2%, 平均 4.1%) 含量相对较高。本亚带孢粉浓度偏低, 总浓度为 37~205 粒/g, 平均为 91 粒/g。

I b 带 (400~320cm, 1635~1720 年): 与 I a 相比, 本亚带乔木花粉总含量 (6.9%) 减少, 以松属花粉 (0.6%~3.8%, 平均 2.5%) 为主; 灌木花粉总量 (36.5%) 增加, 其

中桤柳属 (9.5%~53.8%, 平均 24.7%) 和霸王属 (0~12.2%, 平均 6.4%) 花粉含量增加显著; 草本花粉含量变化不明显。孢粉浓度较上一阶段有所增多, 总浓度为 15~714 粒/g, 平均为 157 粒/g。

I c 带 (320~226cm, 1720~1810 年): 本亚带乔木花粉含量 (7.8%) 仍较低, 其中松属 (1.9%~5.3%, 平均 3.1%)、柳属花粉 (2.5%~7.3%, 平均 4.3%) 含量略有增加; 灌木花粉以霸王属 (0.9%~29.9%, 平均 12.0%)、桤柳属 (10.3%~42.3%, 平均 21.3%) 上升明显; 草本花粉含量显著减少, 仍以蒿属 (5.9%~16.6%, 平均 8.8%)、禾本科 (2.2%~10.2%, 平均 6.4%)、藜科 (3.8%~11.9%, 平均 6.3%) 和菊科 (0.3%~2.7%, 平均 0.9%) 为主; 香蒲属等湿生植物花粉降低明显。孢粉浓度降低, 总浓度为 10~143 粒/g, 平均为 80 粒/g。

#### 4.3.2 孢粉带 II (226~136.9cm, 1811~1879 年)

本带花粉组合具有明显的时段特征, 主要表现为以灌木花粉含量 (74.8%) 显著增加, 为研究时段内含量最多的时期; 乔木花粉含量 (1.3%) 显著减少, 为研究时段内含量最少阶段。灌木花粉以桤柳属 (57.1%~79.1%, 平均 71%) 占据绝对优势, 蔷薇科、白刺科、胡颓子科花粉含量相对较低; 草本花粉含量显著减少, 以蒿属 (5.9%~16.6%, 平均 8.8%)、禾本科 (2.2%~10.2%, 平均 6.4%)、藜科 (3.8%~11.9%, 平均 6.3%) 和菊科 (0.3%~2.7%, 平均 0.9%) 为主。孢粉浓度达到研究时段最高值, 总浓度为 26~5422 粒/g, 平均为 1344 粒/g。

#### 4.3.3 孢粉带 III (136.9~0.00cm, 1880~2010 年)

与 II 带相比, 本带乔木花粉数量 (11.1%) 有所增加, 灌木花粉所占比例 (38.9%) 明显下降, 草本花粉 (50.0%) 上升显著。乔木花粉中, 柳属 (0~23.4%, 平均 8.4%) 显著增加, 松属 (0~4.2%, 平均 1.4%) 有所增加; 灌木植物桤柳属 (8.6%~77.1%, 平均 28.5%) 含量显著减少, 而蔷薇科 (0.4%~8.7%, 平均 3.6%)、胡颓子科 (0.2%~11.4%, 平均 3.3%) 等类型含量有所增加; 草本植物以禾本科 (8.4%~28.6%, 平均 17.2%)、蒿属 (3.4%~24.2%, 平均 12.6%)、藜科 (3.6%~15.8%, 平均 10.2%) 和菊科 (0.6%~13.8%, 平均 5.3%) 为主, 花粉数量显著增加; 湿生植物香蒲属 (0~7.1%, 平均 1.6%) 花粉有所增加。根据孢粉组合变化, 孢粉带 III 可划分为 IIIa 和 IIIb 两个亚带。

IIIa 带 (136.9~65.8cm, 1879~1959 年): 本亚带乔木花粉含量 (9.8%) 有所增加, 主要表现为柳属 (0.7%~23.4%, 平均 7.4%)、松属 (0~4.2%, 平均 1.6%) 花粉含量明显上升; 灌木花粉中桤柳属 (8.6%~77.1%, 平均 31.6%) 含量明显下降, 胡颓子科 (0~5.4%,

平均 2.5%)，蔷薇科 (0~7.9%，平均 2.6%) 含量增加；草本植物中禾本科 (8.7%~27.6%，平均 17.4%) 花粉含量增加最为显著，蒿属、藜科、菊科含量有所增加。本亚带孢粉浓度明显下降，总浓度为 23~4606 粒/g，平均为 445 粒/g。

IIIb 带 (65.8~0.00cm, 1959~2010 年)：本亚带乔木花粉中胡桃科含量 (0~3.2%，平均 0.8%) 下降，柳属 (0~18.5%，平均 10.3%) 和杨属 (0~3.6%，平均 0.7%) 含量上升，灌木花粉仍以桤柳属 (8.7~67.4%，平均 23.2%)、蔷薇科 (0.4~7.9%，平均 5.4%)、胡颓子科 (0.2%~11.4%，平均 4.7%) 为主，但含量都相对上一阶段有所下降；草本花粉以蒿属 (8.0%~19.7%，平均 13.6%)、藜科 (8.1%~15.8%，平均 11.3%)、小禾本科 (8.4%~28.6%，平均 16.9) 为主，较上一阶段总含量有所下降。此外，本亚带出现了一定比例的农作物花粉类型 (4%)，指示该阶段人类活动相对增强。本亚带孢粉浓度明显下降，总浓度为 86~5866 粒/g，平均为 597 粒/g。

## 五 古气候的定量重建

### 5.1 WAPLS 法进行古气候定量重建

目前,常用的古气候定量重建方法主要有最佳类比法<sup>[62]</sup>(MAT)、气候区间法<sup>[63]</sup>(CAM)、花粉—气候相应面法<sup>[64]</sup>(PRS)等。不同定量重建方法具有不同的优点和缺点以及各自的适用范围。因此,我们在古气候定量重建时,根据研究区域的特殊要求以及当地的气候环境条件选择适宜的方法。

转换函数法是指选取当地具有代表性的孢粉类型,建立孢粉类型与当地现代气候的线性回归方程,将化石孢粉组合代入回归方程,求得古气候参数。目前而言,最常用的方法是 WAPLS 法,即在利用孢粉数据建立转换方程时,采用加权平均偏最小二乘法,减小了转换方程时产生的边际效应<sup>[65]</sup>。其优点表现为考虑到了孢粉与气候间的关系为非线性关系,采用多种类型的孢粉组合而不是少数的几种孢粉类型来建立孢粉与气候之间的关系,这样就很大程度上提高了重建结果的可靠性、准确性。因此,本研究采用 WAPLS 方法对孢粉数据进行古气候定量重建,计算步骤通过 C2 软件实现。

具体方法是利用东亚表土花粉数据库 (<http://capd.sysu.edu.cn>),根据研究剖面所处位置及植被区划,共选取新疆地区温带草原区、温带荒漠草原区和温带灌木~半灌木荒漠区表土样品 273 个用于古气候定量重建。再根据分析结果中相关系数的显著性,找出效果较好的重建数值。

具体方法为:首先建立 273 个表土孢粉数据与降水量之间的定量关系模型,表土样点降水的观测值与估测值之间的相关系数 ( $R^2$ ) 为 0.71,误差值达到 40.7 mm (表 2),表明观测值与估测值之间的线性关系较差。其次,根据预测残差值范围对表土花粉数据库进行筛选(筛选条件为  $RMSEP < 60$  mm),最终获得 253 个表土花粉数据。利用 253 个表土花粉数据库重新构建定量模型,结果显示年降水量的推导误差为 29.50 mm,其观测值与估测值之间的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.83,  $t < 0.001$ ,说明建立的研究区表土孢粉与降水量之间的模型关系可靠,可以用于古降水重建。

在上述研究基础上,构建了 273 个表土孢粉数据与气温之间的定量关系,结果显示表土样点气温的观测值与估测值之间的相关系数 ( $R^2$ ) 为 0.58,误差值达到 2.49 °C (表 2)。本文根据预测残差值范围对表土花粉数据库进行筛选(筛选条件为  $RMSEP < 2$  °C),最终获得 233 个表土花粉数据,进而重新构建定量关系模型。新模型结果显示年平均气

温的推导误差为 1.33 °C，其观测值与估测值之间的相关系数 ( $R^2$ ) 为 0.80， $t < 0.001$ ，说明建立的研究区表土孢粉与气温之间的模型关系同样可靠。

表 2 孢粉组合与气候要素的相关性

Table 2 Correlation analysis between spore-pollen assemblages and climate elements

气候要素	样品数量 (个)	相关系数 ( $R^2$ )	平均偏差	预测误差	随机 t 检验
年降水量	273 (未筛选)	0.71	0.33	40.70	0.001
	253 (筛选后)	0.83	0.07	29.50	0.001
年平均温度	273 (未筛选)	0.58	0.06	2.49	0.017
	233 (筛选后)	0.80	0.02	1.38	0.001

注：观测值与估测值之间的决定系数 ( $R^2$ )  $> 0.80$ ，T 检验  $< 0.001$ ，表明观测值与估测值之间呈明显的线性关系，说明建立的研究区表土孢粉与气候之间的关系模型(WALPS)可靠，可信度高。

## 5.2 古气候定量重建结果

依据定量重建的气候要素值 (图 9)，研究区气候大致可分为 3 个大阶段和 9 个次一级阶段。

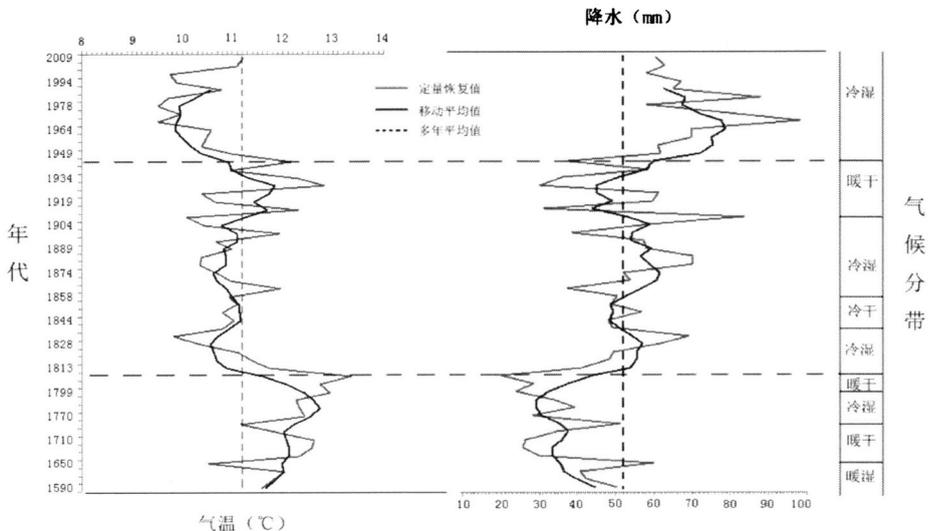


图 9 达玛沟地区近 400 年来气候定量重建结果

Fig. 9 Quantitative reconstruction of climate at Damagou during the past about 400 years

第一阶段：1590~1810年，该阶段总体上为暖干期，但也存在相对冷湿的时期，平均气温为10.5~13.4℃，平均12.0℃，降水量为19.7~60.1mm，平均37.4mm。可分为四个次一级阶段：1590~1650年，为暖干偏湿期，年均温为10.5~12.0℃，平均11.6℃，降水量为40.8~60.1mm，平均41.4mm；1651~1730年，为暖干期，年均温为10.5~12.6℃，平均12.2℃，降水量为25.6~60.1mm，平均32.0mm；1731~1794年，为暖干偏冷湿期，年均温为11.2~12.4℃，平均11.9℃，降水量为28.4~51.3mm，平均38.6mm；1795~1810年，为暖干期，年均温为12.3~13.4℃，平均12.9℃，降水量为19.7~33.8mm，平均25.5mm。

第二阶段：1811~1945年，该阶段是研究时段的一个由暖干向冷湿的过渡期，这一阶段年平均气温为9.8~13.4℃，平均10.9℃，降水量为19.7~83.8mm，平均54.3mm，但伴有一次明显的干湿波动。其中，1811~1838年，为偏冷湿期，年均温为9.8~13.4℃，平均11.0℃，降水量为19.7~69.3mm，平均52.3mm；1839~1858年，为该阶段的一个偏冷干期，年均温为10.8~11.1℃，平均10.9℃，降水量为48.1~57.0mm，平均50.1mm；1859~1909年，为偏冷湿期，年均温为10.1~12.0℃，平均10.9℃，降水量为37.3~87.8mm，平均56.6mm；1910~1945年，是该阶段的又一个偏暖干期，年均温为10.1~12.8℃，平均11.6℃，降水量为30.1~83.8mm，平均47.4mm。

第三阶段：1946~2010年，是研究区的一个冷湿期，年均温为9.5~12.2℃，平均10.3℃，降水量为37.8~98.5mm，平均68.9mm，降水量增加明显。

## 六 讨 论

诸多研究表明,水分是制约干旱区植被生长的重要因素,其不仅影响植物的繁茂程度,同时影响植被类型的演化<sup>[66]</sup>。因此,可以根据鉴定结果中孢粉种类的组合特征和丰富度以及某些具特定环境指示意义的植物(如干旱地区相对喜湿的禾本科植物)可恢复地质历史时期区域干湿变化过程<sup>[67-68]</sup>。

达玛沟红柳沙包剖面的孢粉分析结果显示,1590~1810年,为长达220年的一个气候暖干期,研究区域周边主要生长以禾本科、蒿属、藜科、菊科等为主的草本和以柽柳属为主的灌丛植被,湿生植物香蒲也占有一定比例,当时植被景观为荒漠草原。但是,1635~1720年,绿洲面积处于逐渐缩小甚至消失状态,表明整体湿润期内有相对干旱期的存在。

整体来看,1590~1810年的气候暖干期,仍经历了一个湿润~干旱~湿润~干旱的转变过程(图9),这与钟巍等<sup>[66]</sup>利用塔格勒剖面(策勒绿洲)分析结果基本一致,同时与尹红等<sup>[68]</sup>北疆地区树轮资料和巴里坤湖地球化学指标反映的结果都有较好对应性。结合已有研究,可以推测小冰期的低温条件和北大西洋涛动的负异常导致西风带位置南移、强度增强<sup>[69]</sup>,使得到达研究区的水汽产生变化<sup>[70]</sup>,促使该阶段的干旱与湿润交替且时期相对较长。

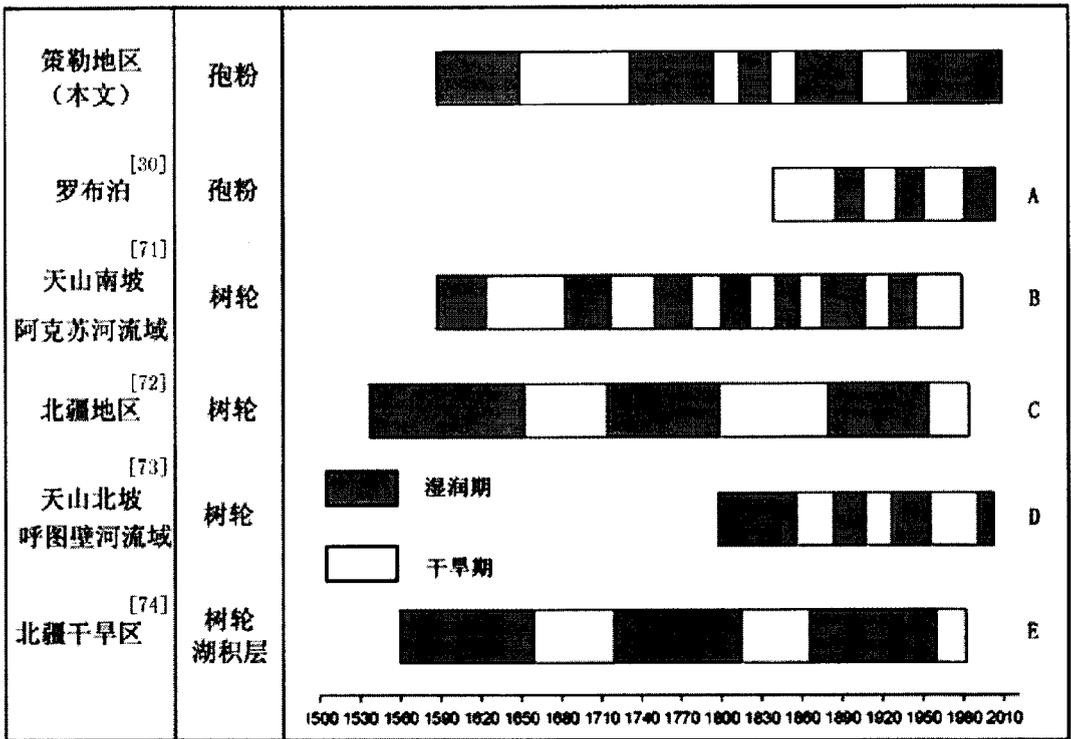


图 10 达玛沟与新疆其他地区干湿变化对比

Fig. 10 Comparison of dry-wet change between Damagou and other regions of Xinjiang

1811~1945 年，是一个由暖干向冷湿的过渡期，气候波动较大，虽仍以荒漠灌丛植被为主，但植被面积有所扩大。已有研究表明，19 世纪初至 20 世纪初，我国西北内陆干旱区均出现短暂的气候干旱事件<sup>[75-76]</sup>（图 10）。古里雅冰芯和敦德冰芯分别记录了 1830~1880 年、1800~1870 年的干燥气候事件<sup>[77-78]</sup>；德令哈和都兰的树轮年表也记录了此阶段出现的冷事件<sup>[79-80]</sup>。本研究定量恢复结果显示的 1839~1858 年和 1910~1945 年的两个干旱期，与陈建徽等<sup>[81]</sup>中国西北干旱区小冰期湿度变化特征资料重建干湿变化阶段相一致，张瑞波等<sup>[71]</sup>1396~2005 年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析反应的结果也有很好的对应，并且王涛等认为小冰期内的冷期是该阶的干旱的原因<sup>[82]</sup>。

1946~2010 年，研究区逐渐步入又一个湿润期，特别在 1980 年以后研究区湿润程度增加更为显著。与区域记录相比，该阶段湿润期起始时间与天山和北疆地区树轮资料具有极好的一致性（图 10）；但在 1950~1980 年期间，相关记录<sup>[72、74]</sup>均表现出短暂的气候干旱，而在该研究区域则呈现出降水增多、温度下降的趋势。我们认为可能与绿洲面积快速扩大有关。

1939年策勒县耕地面积仅有耕地124615亩,到1944年,策勒县耕地面积达到336779亩,后三年稍有反复,到1948年策勒县耕地面积又增加到352426亩,仅10年时间,策勒县通过垦荒净增耕地多达227811亩,净增长率可以达到182.8%<sup>[83]</sup>。绿洲面积剧增,使策勒县显现出明显的“绿洲效应”,包括绿洲的冷岛效应、风屏作用和增雨效应等<sup>[84]</sup>,从而引起研究区短时间内的小幅度降温和大程度的增湿。该阶段大量农作物禾本科花粉的出现也强有力证明了人类活动增强的事实。待绿洲面积稳定以后,研究区气温又随全球变化同步,温度逐渐回升。特别是在20世纪80年代以后,研究区变暖趋势更为显著。

宋连春等<sup>[85]</sup>研究认为,近百年来我国内陆干旱区降水呈逐渐增加趋势。策勒县1960年以来气象观测资料也显示,该阶段降水明显增加<sup>[86]</sup>。但在1970年代左右,研究区降水呈现出一个下降趋势,我们认为与该区工业、农业生产有密切关系,俎瑞平等<sup>[19]</sup>研究指出人工绿洲过渡使用河流水,会给天然绿洲的生长环境带来一系列问题,如因水量不够引起的植被草场退化、绿洲面积减小、土地荒漠化等问题。我们认为有可能是由于流域上、中游农业、工业、生活用水量的增加,造成下游地区地下水位持续下降,土壤水分短缺,植物生长水分条件恶化,红柳所反映的水分条件变差。

张雪芹等<sup>[87]</sup>研究得出,1961~2007年我国干旱区年平均气温呈上升趋势,平均气温线性变化率为 $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,47年间平均气温约上升了 $1.8^{\circ}\text{C}$ 。研究区定量重建结果显示,1961~2007年,研究区47年间平均气温约上升了 $1.7^{\circ}\text{C}$ ,平均气温升温速率为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,研究结论有很好的对应。

## 七 结论

(1) 近 400 年来, 策勒达玛沟地区孢粉组合以灌木为主, 藜科、桤柳是其主要成分; 草本植物花粉次之, 以蒿属、菊科、禾本科花粉为主; 乔木花粉较少; 蕨类孢子很少出现, 水生植物以香蒲为主, 但其含量一直处于极低水平; 20 世纪 40 年代以后, 农作物花粉含量增多, 指示人类活动影响逐渐增强。

(2) 1590~1810 年, 研究区植被为以禾本科、蒿属、藜科和桤柳科植物为主的草原荒漠植被类型, 并伴生有耐旱的白刺属和麻黄属植物; 1811~1879 年, 研究区孢粉组合以桤柳科花粉占绝对优势, 反映以桤柳、藜科为主的荒漠灌丛植被; 1879~2010 年, 植被类型仍以荒漠灌丛植被为主, 蒿属、禾本科等草本花粉数量明显增加, 乔木种类数量也有所增加, 表明植被条件逐渐好转。

(3) 气候变化可分为三个阶段: 1590~1810 年, 气候总体处于相对暖干, 且气候波动较大; 1811~1945 年, 是研究区的一个相对冷湿期, 但出现了 1839~1858 年的干旱期; 1946~2010 年, 气候总体上表现出增温增湿趋势。

(4) 1879 年以前, 塔南地区降水和湿度变化主要受西风带的强度和位置影响; 1880 年以后, 全球变暖趋势增强, 特别是在 20 世纪 80 年代后, 研究区出现了气候转向湿润的强劲信号, 可能与全球变暖导致该区域内水汽增加有关。

## 参考文献

- [1] 慈龙骏. 全球变化对我国荒漠化的影响. 自然资源学报, 1994, 9(4): 289-290.
- [2] 董光荣, 吴波, 慈龙骏, 等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策. 中国沙漠, 1999, 19(4): 22-36.
- [3] 龚新梅. 新疆土地荒漠化时空变化特征及驱动因子分析. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007.
- [4] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.
- [5] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. 地理学报, 1999, 54(02): 31-39.
- [6] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测. 地球物理学报, 2004, 47(04): 590-596.
- [7] 尚可政, 董光荣. 我国北方沙区气候变化对全球变暖的响应. 中国沙漠, 2001, 21(4): 387-392.
- [8] 王让会, 游先祥. 西部干旱区内陆河流域脆弱生态环境研究进展. 地球科学进展, 2001, 16(1): 39-44.
- [9] 董光荣, 陈惠忠, 王贵勇, 等. 150ka 以来中国北方沙漠、沙地演化和气候变化. 中国科学 (B), 1995, 25(12): 1303-1312.
- [10] 张春轶, 瓦哈甫·哈力克, 马燕等. 典型干旱区土地利用变化的生态环境外部性分析——以策勒绿洲为例. 云南地理环境研究, 2007, 19(1): 28-33.
- [11] 满苏尔·沙比提, 米娜瓦尔·斯拉吉丁, 吐尼沙古丽·牙生. 近 40 年来新疆策勒绿洲气候变化特征分析. 水文, 2009, 29 (1): 89-92.
- [12] 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.
- [13] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响. 干旱气象, 2010, 28(1): 1-7.
- [14] 朱震达. 全球变化与荒漠化. 地学前缘, 1997, 4(1): 213-219.
- [15] 刘倩, 高辰晶, 赵元杰, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包落叶阳离子含量及气候环境变化. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1326-1334.
- [16] 孙增英, 张静, 曾佳, 等. 利用红柳沙包沉积纹层揭示罗布泊地区近现代的气候

- 变化. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 127-133.
- [17] 赵元杰, 王晓毅, 夏训诚, 等. 新疆罗布泊地区近 160 年来红柳沙包沉积纹层  $\delta^{13}\text{C}$  与气候重建. 第四纪研究, 2011, 31(1): 130-136.
- [18] 王立国. 塔里木盆地南缘 4.0 ka 来气候与环境演变研究. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2003.
- [19] 俎瑞平, 高前兆, 钱鞠, 等. 2000 年来塔里木盆地南缘绿洲环境演变. 中国沙漠, 2001, 21(2): 122-128.
- [20] 李芊. 新疆怪柳属植物抗盐机理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文, 2002.
- [21] 夏训诚, 赵元杰, 王富葆. 中国罗布泊[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [22] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 怪柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 252-256.
- [23] 陈阳, 王贺, 张福锁, 等. 新疆荒漠盐碱生境怪柳盐分分泌特点及其影响因子[J]. 生态学报, 2010 (2): 511-518.
- [24] 宋艳. 罗布泊地区红柳沙包沙物质粒度特征及其环境信息记录 [D]. 河北: 河北师范大学, 2008.
- [25] 赵元杰, 王晓毅, 夏训诚, 等. 新疆罗布泊地区近 160 年来红柳沙包沉积纹层  $\delta^{13}\text{C}$  与气候重建[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1): 130-136.
- [26] 夏训诚, 曹琼英, 王富葆, 等. 罗布泊地区红柳沙包年层的研究意义[J]. 干旱区地理, 2006, 28(5): 565-568.
- [27] 夏训诚, 赵元杰. 罗布泊地区环境研究的若干新进展[J]. 中国科学基金, 2005, 19(4): 196-200.
- [28] 夏训诚, 赵元杰, 王富葆, 等. 红柳沙包的层状特征及其可能的年代学意义[J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1337-1338.
- [29] 孙增英. 利用红柳沙包沉积纹层  $\delta^{13}\text{C}$  揭示塔克拉玛干沙漠南缘地区气候变化 [D]. 河北师范大学, 2013.
- [30] 王筠, 赵元杰. 近 200 年以来罗布泊地区红柳沙包孢粉组合特征及其反映的植被和气候变化[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 609-619.
- [31] 赵元杰, 王晓毅, 夏训诚, 等. 新疆罗布泊地区近 160 年来红柳沙包沉积纹层  $\delta^{13}\text{C}$  与气候重建[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1): 130-136.

- [32] 沈睿媛, 李秀丽, 夏训诚, 等. 罗布泊红柳沙包落叶阳离子含量及环境指示意义[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 109.
- [33] 赵娟, 赵元杰, 夏训诚. 罗布泊红柳沙包记录的极端气候事件及影响因素[J]. 干旱区研究, 2012, 29(006): 1094-1099.
- [34] 汪骏鸿, 赵元杰. 利用红柳沙包氢氧同位素重建罗布泊地区近 160 年间气候要素[J]. 第四纪研究, 2011, 31(6): 1045-1052.
- [35] 郑卓, 黄康有, 魏金辉, 等. 中国及其邻区现代孢粉数据: 空间分布特征和定量古环境重建中的应用[J]. 第四纪研究, 2013, 33(6): 1037-1053.
- [36] 冯晓华, 阎顺, 倪健. 基于孢粉的新疆全新世植被重建[J]. 第四纪研究, 2012, 32(2): 304-317.
- [37] 温锐林, 肖举乐, 常志刚, 等. 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, 30(6): 1105-1115.
- [38] 邓韞, 郑卓. 中国东部花粉比值与气候的关系及其在定量古气候重建中的应用[J]. 古生物学报, 2002, 41(4): 508-516.
- [39] 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 熊黑钢, 等. 塔里木盆地南缘绿洲荒漠化动态变化遥感研究——以策勒县为例. 遥感学报, 2002, 6(1): 56-62.
- [40] 陈昌笃, 张妙弟, 杨立庄, 等. 新疆策勒县低山和平原区的植被及其与防治沙化的关系. 干旱区研究, 1987, 1(1): 28-40.
- [41] 赵元杰, 宋艳, 夏训诚, 等. 近 150 年来罗布泊红柳沙包沉积纹层沙物质粒度特征. 干旱区资源与环境. 2009, 23(12): 103-107.
- [42] 游海涛, 刘强, 刘嘉麒, 等. 纹层计年与  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  法对比研究东北二龙湾玛珥湖现代沉积速率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 59-64
- [43] Krishnaswamy S., Lal D., Martin J. M., et al. Geochronology of lake sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, (11): 407-414.
- [44] Robbins J. A., Edgington D. N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, (39): 285-304.
- [45] Koide M, Soutar A., Goldberg E. D., et al. Marine geochronology with  $^{210}\text{Pb}$  [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1972, (14): 442-446.
- [46] Nittreouer C. A., Sternberg R. W., Carpenter R, et al. The use of  $^{210}\text{Pb}$  geochronology

- as a sedimentological tool: Application to the Washington continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1979, (31): 297-316.
- [47] DeMaster D. J., Mckee B. A., Nittrouer C. A., et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, (4): 143-158.
- [48] 陈文寄, 计凤桔, 王非. 年轻地质体系的年代测定(续) ——新方法、新进展[M]. 北京: 地震出版社, 1999
- [49] 陆国琦. 铅-210 法测年及其在地理学研究中的应用[J]. *热带地理*, 1984, 4(4): 57-64.
- [50] 赵一阳, 钱江初, 赵一阳, 等. 美国 Pb~(210) 同位素地质年代学方法[J]. *海洋科学*, 1981, 3: 44-45.
- [51] Grozaz G.P, Icciotto E., De Breuck W. Antarctic snow chronology with  $^{210}\text{Pb}$  [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(12): 2597-2604
- [52] 陈绍勇, 李文权, 施文远, 等. 湄州湾沉积物的混合速率和沉积速率的研究[J]. *海洋学报 (中文版)*, 1988, 5: 005.
- [53] 曹建廷, 王苏民. 内蒙古岱海地区近千年气候环境演变的初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(2): 15-20.
- [54] 王昕. 冰后期以来长江水下三角洲地区沉积作用及沉积环境演化[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.
- [55] 李淑媛, 刘国贤, 苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. *中国环境科学*, 1994, 05: 370-376
- [56] 万国江. 现代沉积的  $^{210}\text{Pb}$  计年[J]. *第四纪研究*, 1997, 17(3): 230-239.
- [57] 胡智育.  $^{14}\text{C}$  测定年代报告 (四)[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(4): 430-434.
- [58] 王辉. 红柳沙包沉积纹层的年代学及其应用研究. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [59] Faegri K, Iversen J. *Textbook of pollen analysis (3rd edition)*. Oxford: Blackwell, 1989.
- [60] 王伏雄. *植物杂志*. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [61] Grimm N B. Role of macroinvertebrates in nitrogen dynamics of a desert stream[J]. *Ecology*, 1988: 1884-1893.
- [62] Nakagawa R, Naka T, Tsutsui H, et al. SOCS-1 participates in negative regulation of

LPS responses[J]. *Immunity*, 2002, 17(5): 677-687.

- [63] Fauquette S, Guiot J, Suc J. A method for climatic reconstruction of the Mediterranean Pliocene using pollen data [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 144(1): 183-201
- [64] Birks E J, Tansley P D, Hardy J, et al. Left ventricular assist device and drug therapy for the reversal of heart failure [J]. *New England Journal of Medicine*, 2006, 355(18): 1873-1884.
- [65] Braak ter C J F, Juggins S. Weighted averaging partial least squares regression (WAPLS): An improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages. *Hydrobiologia*, 1993, 269/270 (1): 485-502.
- [66] 钟巍, 熊黑钢, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 策勒绿洲塔格勒剖面孢粉分析的初步结果. *干旱区研究*, 1998, 15(3): 14-18.
- [67] 孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 等. 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, 14(3): 239-247
- [68] 尹红, 袁玉江, 刘洪滨, 等. 1543~2001 年北疆区域年降水量变化特征分析. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 605-612.
- [69] Hurrell J W, Van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation [J]. *Climatic Change*, 1997, (36): 301-326.
- [70] 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. *中国科学(D)*, 2007, 37(1): 77-85.
- [71] 张瑞波, 魏文寿, 袁玉江, 等. 1396~2005 年天山南坡阿克苏河流域降水序列重建与分析. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 27-33.
- [72] 袁玉江, 韩淑媿. 北疆 500 年干湿变化特征. *冰川冻土*, 1991, 13(4): 315-322.
- [73] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山北坡呼图壁河流域近 313 年降水的重建与分析. *干旱区研究*, 2009, 26 (1): 130-134.
- [74] 韩淑媿, 王承义, 袁玉江. 北疆干旱区 500 年来环境演变序列. *中国沙漠*, 1992, 12(1): 1-8.
- [75] 王绍武, 蔡静宁, 慕巧珍, 等. 中国西部年降水量的气候变化. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 415-422.
- [76] 徐国昌, 姚辉, 李珊. 中国干旱~半干旱区当代气候变化. *第四纪研究*, 1997,

17(2): 105-114.

- [77] 姚檀栋, 焦克勤, 杨志红, 等. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化. 中国科学(B), 1995, 25(10): 1108-1114.
- [78] Yao T D, Xie Z C, Yang Q Z. Temperature and precipitation fluctuations since 1600a provided by Dunde ice cap, China. In: International Symposium on Glaciers-Ocean-Atmosphere Interactions, Moscow: IAHS publ 208, 1991.
- [79] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的德令哈地区千年降水变化. 中国科学(D), 2004, 34(2): 145-153.
- [80] Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1739-1742.
- [81] 陈建徽, 陈发虎, 张家武, 等. 中国西北干旱区小冰期的湿度变化特征. 地理学报, 2008, 63(1): 23-33.
- [82] 王涛, 杨保, A.Braeuning, 等. 近 0.5ka 来中国北方干旱半干旱地区的降水变化分析. 科学通报, 2004, 49(9): 883-887
- [83] 谢丽. 民国时期和田地区耕地大面积撂荒及其影响因素研究. 中国农史, 2005, (1): 88-99.
- [84] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 等. 再议绿洲~沙漠过渡带——以策勒绿洲~沙漠过渡带为例. 干旱区地理, 2013, 36(2): 196-201.
- [85] 宋连春, 张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征 [J][J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143-148.
- [86] 曾佳, 郭峰, 赵灿, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘小绿洲近 50a 来气候变化特征[J]. 干旱区地理, 2014, 05: 948-957.
- [87] 张雪芹, 孙杨, 毛炜峰, 等. 中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应. 干旱区研究, 2010, 27(4): 143-148

## 致 谢

时光荏苒，岁月如梭。转眼之间三年的研究生学习生活即将画上一个圆满的句号。在这三年学习生活中，有太多的事、太多的人需要铭记，需要感谢。

首先，向我的导师赵元杰教授致以衷心的感谢和崇高的敬意！导师在学术和生活中睿智、沉稳、扎实的风格，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，吃苦耐劳的精神深深地感染和激励着我，导师在学习工作上的精神和毅力将使我终生受益。通过论文的选题、文献的收集等工作，到论文的写作等，都是在导师的悉心指导下完成。三年来，导师在学习和生活中给了我无微不至的关怀和帮助，为我创造了有利的学习和研究条件。

在这三年紧张又充实的研究生求学生涯中，感谢同实验室的兄弟姐妹们：曾佳、孙增英、王辉、刘倩、高辰晶、赵灿、李璐、方媛；感谢同舍好友陪伴我度过了三年美好的时光。特别感谢我父母、家人对我的关心和爱护，你们的支持使我在前进的路上充满动力。你们的健康、快乐是我最大的心愿。

感谢答辩委员会的各位专家老师在百忙之中评阅我的论文。

最后，我再次感谢所有关心和帮助过我的老师们、家人和朋友们，衷心祝你们身体健康！平安快乐！

## 攻读学位期间取得的科研成果清单

文章名称	发表刊物 (出版社)	刊发时间	刊物 级别	署名 次序
近 400 年来塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包孢粉组合与古气候重建	古生物学报	2015 年 9 月	国家级 核心	1
塔克拉玛干沙漠南缘小绿洲近 50 a 来气候变化特征	干旱区地理	2014 年 7 月	国家级 核心	2
近 200 年来安迪尔故城红柳沙包孢粉组合与环境变化	干旱区资源 与环境	2015 年 11 月	国家级 核心	2

项目名称	项目级别	主要工作	参与时间
基于红柳沙包信息重建数百年来塔克拉玛干沙漠南缘高分辨率气候变化序列	国家自然科学基金	实验样品前期处理, 基础数据处理	2012 年 9 月— 2013 年 12 月
罗布泊地区高分辨率近代气候环境重建研究	NSFC-新疆联合基金“重点支持项目”	野外考察、样品采集	2014 年 10 月— 2015 年 5 月
饶阳县土地整治规划	厅局级	参与者	2013 年 7 月— 2014 年 5 月
饶阳县永久性基本农田划定	省级	参与者	2013 年 4 月— 2013 年 10 月
新乐市城区土地级别与基准地价更新	厅局级	参与者	2013 年 12 月— 2014 年 5 月
饶阳县 2013 年土地变更调查	厅局级	数据的入库、管理	2013 年 12 月— 2014 年 8 月
河北晋州市土地集约利用评价	厅局级	参与者	2014 年 5 月— 2014 年 8 月