

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)

**塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包有机
质 C、N 和 C/N 记录的环境信息研究**

Study of Environmental Information Based on C、N
and C/N Recorded in Tamarix Cone Sedimentary
Veins in South Margin of Taklimakan Desert

研究生姓名: 曾佳

指导教师: 赵元杰

学科专业名称: 自然地理学

研究方向: 环境演变与全球变化

论文开题日期: 2012 年 9 月 18 日

学位论文原创性声明



本人所提交的学位论文《塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包有机质 C、N 和 C/N 记录的环境信息研究》，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）：

2013 年 5 月 29 日

指导教师确认（签名）：

2013 年 5 月 29 日

学位论文授权使用授权书

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）：

2013 年 5 月 29 日

指导教师（签名）：

2013 年 5 月 29 日

摘要

全球变化科学 (Global Change Science) 是 20 世纪 70 年代开始兴起的新兴科学领域之一, 其目的在于描述和理解人类赖以生存的地球环境系统的运转机制以及它的变化规律和人类活动对地球环境系统的影响, 提高人类对环境变化的预测和评估能力; 通过对气候环境变化具有清晰纪录作用的信息载体, 结合历史文献记录, 对古气候环境的演变进行重建, 从而推断生态系统对气候变化的响应研究。

塔里木盆地位于我国新疆南部, 被阿尔金山、昆仑山、喀喇昆仑山、天山等所环绕, 其中心坐落着我国最大的沙漠——塔克拉玛干沙漠。盆地内部干旱多风, 为典型极端干旱区, 大陆性气候明显, 降水多集中于夏季, 冬季湿度较大。河流补给依赖于周围山系的降水和冰雪融水。植被以红柳灌丛、灌木和多汁木本盐类植物为主, 流动沙丘上被少量红柳、芦苇等覆盖。由于水资源缺乏且补给不稳定, 盆地中形成了以绿洲为基础, 相对封闭、独立的脆弱生态系统。

红柳耐寒、耐热, 寿命长, 生命力强, 对干旱高温的沙漠环境具有良好的适应能力, 根茎处遭风沙掩埋后, 可以萌发不定根, 保证枝条的继续生长。秋季脱落的枝叶经冬季风雪压实后形成枯枝落叶层和春季形成风沙沉积物构成层理, 即“红柳沙包年层”。“红柳沙包年层”的厚度取决于当年的风沙强度、沙尘暴次数和红柳的生长量, 代表着沙包每年增长的物质记录, 而沙包中红柳的枯荣则受当地当年的气候环境条件的控制, 经过多年的交替叠加逐渐形成具有清晰层状结构的高大红柳沙包, 因此和树木年轮一样, “红柳沙包年层”具备计年和储存环境信息的功能。通过对红柳沙包组成物质的分析可以对数百年来研究区域的气候和环境变化进行重建和探讨, 因此红柳沙包可以成为干旱区气候环境变化研究的重要工具。

本文选取位于塔克拉玛干沙漠南缘策勒地区和安迪尔地区的红柳沙包为主要研究对象, 通过对研究地点的环境调查和采样点的红柳沙包的测量及采样, 分别对 A、B 和 C 三个采样点红柳沙包有机质 1790 年至 2010 年间 221 年的 TOC (总碳)、TN (总氮) 和 C/N (碳氮比) 进行分析和对比, 并结合研究区域气候环境记录资料, 探讨近二百年来研究区域气候环境的变化。所得结论如下:

(1) 红柳落叶中 TOC、TN 和 C/N 之间存在显著的相关关系。TN 是决定 C/N 变化的主要因素。

(2) 近 221 年来, 研究样本中 TOC 含量出现明显上升, 三组样本中线性倾向值分别为 0.101%/10a、0.284%/10a 和 0.111%/10a; A 组和 B 组样本中的 TN 含量逐年下降, 倾向值分别为 -0.03%/10a 和 -0.012%/10a; B 组样本中 TN 出现上升趋势, 倾向值为 0.06%/10a; A 组和 B 组样本中 C/N 明显升高, 倾向值分别为 1.784/10a 和 0.378/10a; B 组样本 C/N 出现明显下降趋势, 倾向值为 -0.61/10a。

(3) 沉积纹层中落叶有机质的 TOC、TN 和 C/N 含量受到区域温度和降水的影响。当温度上升时, TOC 含量出现增加; 而当 TN 含量下降、C/N 含量增加时, 意味着区域气候开始进入干燥期。

(4) 采样点所处的区域近 221 年来的气候变化阶段分别为: A 点, 1792~1873 年(冷湿气候), 1874~1958 年(暖干气候), 1959~2010 年(暖干气候); B 点, 1826~1886 年(冷干气候), 1887~1950 年(暖湿气候), 1951~2010 年(暖湿气候); C 点, 1790~1888 年(冷湿气候), 1889~1955 年(暖湿气候) 1956 年~2010 年(暖干气候)。

(5) 研究区域的降水和温度的变化与大气 CO₂ 浓度之间存在着极为显著的相关性关系, CO₂ 浓度增加是研究区降水量和气温增加的主要诱因。

关键词: TOC TN C/N 气候环境 红柳沙包 塔克拉玛干沙漠南缘

Abstract

Global Change Science began to rise in the 1970s and is an emerging fields of science, its purpose is to describe and understand the operation mechanism of the Earth's environment by which human lived and its variation regularity and the impact of human activities on the Earth System, to improve the ability of prediction and assessment of environment change for human, with a clear record of the information carrier of the environmental change history, combined with historical documents, record the evolution of historical climate reconstruction to infer the response of ecosystems to climate change.

Tarim Basin is located in China's southern Xinjiang, the Altun Mountains, the Pamirs, Tianshan and Kunlun Mountains amidst it, China's largest desert, the Taklimakan Desert is located in its central area. The inner basin drought windy, precipitation mostly concentrated in the summer and winter humidity, river recharge is dependent on glacier melt water of the surrounding mountain ranges. The main vegetation including Tamarisk shrub, shrub and succulent woody salt plant, the desert forest is located in a natural oasis, only Tamarisk coverage on the shifting sand dunes, due to the lack of water supply instability, rely oasis, relatively closed, independent fragile ecosystem is formed at the edge of the basin.

Tamarix has a good ability to adapt to the arid desert areas, and has long life, heat-resistant, cold-resistant. Tamarix has ability to adventitious roots when its roots suffered buried, branches grow upward at the same time. Fallen leaves are compacted to form the litter layer containing sand substances, namely "the annual layer". The thickness of the "annual stratum" mainly depends on the intensity of wind, the times of sandstorm and the amount of growth of Tamarix in that year. Owing to the arid climate, the "annual stratum" can be conserved for a long time. Just like dendrochronology, "Annual layers" function per year and save the environment information. The analysis on the compositions of Tamarix Cone can be utilized to research and restore the changes of climate and environment hundreds of years ago, and is one of the powerful tools for researching the changes of environment in the arid zone. So it has a very vital significance in the study of evolvement of ecological environment in arid

desert area.

Selecting Tamarix Cones located in the Cele and Andier as the main object of the study, through the field investigation combined with laboratory analysis, this paper compares the TOC, TN and C / N data in the three samples, and binding studies of regional climate record data, explores the history of climate change, the conclusions are showed as following:

(1) There is a significant correlation between TOC、 TN and C/N of tamarisk defoliation. TN is to determine the main factors of the C / N change.

(2) For nearly 221 years, TOC content increased significantly in the study sample, the linear trend values were 0.101%/10a, 0.284%/10a and 0.111%/10a; TN content in group A and group B sample declining tendency values were -0.03%/10a and -0.012%/10a; samples TN rising trend at a value of 0.06%/10a in Group B; C/N was significantly higher in Group A and group B; C/N clear downward trend, tendency value is -0.61/10a in Group B.

(3) TOC, TN and C/N content were affected by regional temperature and precipitation. When TOC content increases, the temperature rises; when the TN content decreased, the regional climate into the dry period; when C/N rises, the regional climate is dry.

(4) Based on this relationship, the division of the stage: Group A, Group B and Group C sample sites in which climate change in the past 221 years. Point A:1792~1873 (cold and humid) ,1874~1958 (warm and dry) ,1959~2010 (warm and dry) ;Point B:1826~1886 (cold and dry),1887~1950(warm and humid),1951s~2010s(warm and humid);Point C:1790~1888 (cold and humid) ,1889~1955 (warm and humid) ,1956~2010 (warm and dry) .

(4) Correlation analysis between atmospheric CO₂ and the precipitation, temperature, and other al factors, we found temperature, precipitation and CO₂ have a high negative linear correlation.

Key Words: TOC TN C/N climate environment Tamarix cone south margin of Taklimakan Desert

目 录

摘要.....	III
1 绪论.....	1
1.1 选题背景.....	1
1.2 研究目的与意义.....	3
1.2.1 研究目的.....	3
1.2.2 研究意义.....	3
1.3 研究内容与方法.....	4
1.3.1 研究内容.....	4
1.3.2 研究方法.....	4
1.4 技术路线.....	6
2 研究进展.....	7
2.1 红柳沙包的研究进展.....	7
2.1.1 红柳沙包.....	7
2.1.2 红柳沙包对环境变化信息的纪录作用.....	8
2.2 TOC、TN 及碳氮比 (C/N) 和大气 CO ₂ 变化的研究进展.....	9
2.2.1 国内外对 TOC、TC 和 C/N 与气候变化的研究现状.....	9
3 研究区域概况.....	13
3.1 基本情况.....	13
3.2 水资源情况.....	14
3.3 影响塔里木盆地环境演化的因素.....	14
3.4 气候变化特征分析.....	15
4 红柳沙包样品的采集与分析.....	17
4.1 样品采集与处理.....	17
4.1.1 样品采集.....	17
4.1.2 样品处理.....	18
4.2 样品参数测定及处理结果.....	18

4.2.1	沉积纹层年代的确定	18
4.2.2	TOC、TN、C/N 测定结果	21
5	样品数据的分析结果与讨论	22
5.1	TOC、TN、C/N 测定结果的分析	22
5.1.1	TOC、TN、C/N 测定结果的相关性分析	22
5.1.2	TOC、TN、C/N 测定结果的线性分析	23
5.1.3	TOC、TN、C/N、大气 CO ₂ 浓度和气候要素的相关性分析	24
6	红柳沙包记录的环境信息分析	31
6.1	样本中记录的气候变化信息	31
6.1.1	各样本 TOC、TN 和 C/N 变化阶段的划分	31
6.1.2	各样本气候变化阶段分析	33
6.1.3	用红柳有机质研究气候变化的可靠性分析	35
7	结论与展望	39
7.1	主要研究结果	39
7.2	存在的主要问题	40
7.3	未来展望	40
	参考文献	41
	致谢	44

1 绪论

1.1 选题背景

人类的生存和发展离不开地球。工业革命之前，人类对自然环境进行有限的简单加工，这种改造对环境的总体影响十分有限；蒸汽革命之后，以蒸汽机为代表的技术革新为人类社会的生产力带来了突飞猛进的发展，人类在创造崭新社会文明的同时，对自然环境的改造能力得到了飞速发展，对自然资源开采、利用的速度不断加快，强度不断加大；进入 20 世纪，人类活动对自然系统造成的影响已明显超过环境自我修复的强度和速率，开始对人类社会和整个自然系统的未来发展产生深远影响。这种改变对人类社会和地球环境的未来带来了巨大的挑战，但是同时也带来了自然系统的保护和持续利用的巨大机遇：一方面，人类社会的生产和发展为地球环境带来巨大破坏，土地退化、森林面积锐减、掠夺式的资源开采带来的资源短缺、温室气体无节制的排放导致温室效应、大气污染加重、臭氧层损耗加大、人口爆发式增长、粮食危机，人类与自然之间的矛盾不断地加深；另一方面，伴随着科学技术高速发展和科研投入不断加大，研究手段不断多样化，人类对地球系统科学的认识不断加强，针对全球变化开展全面研究的能力明显增强。

全球变化科学（Global Change Science）是 20 世纪 70 年代开始兴起的新兴科学领域。1990 年，美国制定的《全球变化研究法案》对全球变化进行了明确定义：可能改变地球承载生命能力的全球环境变化（包括气候、土地生产力、海洋和其他水资源）、大气化学以及生态系统的改变，其科研目标是对人类赖以生存的地球环境系统的运转机制以及它的变化规律和人类活动对地球系统的影响进行系统的描述和理解，不断提高人类对未来环境变化及其对社会发展影响的预测和评估能力^[1]。为了扩展全球科学的研究背景，1991 年，国际地圈生物圈研究计划（IGBP）设立过去全球变化研究计划（PAGES），试图通过能够记录历史环境变化信息的代用资料，借助有效的现代物理、化学分析技术，重建古气候和古环境，提供能够用于校正数十年到数百年尺度的气候和环境变化模式的数据，以

期能够进一步推断生态系统对气候环境变化的响应机制。

目前,对于地质历史时期气候环境变化的研究和重建,主要通过在同一地质时期形成的各种不同的沉积物及生物遗迹^[2]。已知的高分辨率古环境信息载体包括:冰芯、树木年轮、黄土、深海沉积岩芯、珊瑚、古土壤、洞穴沉积物、湖泊沉积物和历史文献等,存在于不同自然环境下形成的载体不尽相同,确定载体年代的方法及载体所蕴含的环境信息因而产生差异,例如:氧化铁与黄土形成时的气候环境密切相关,黄土地层中碳酸盐岩的碳、氧同位素序列与磁化率、全氧化铁的气候变化的波动一致^[2];生物蛋白质中的氨基酸总量可以代表沉积环境中生物的发育状况,间接指示古环境状况的意义;粉尘粒度与风蚀作用直接相关,丁仲礼等曾选择粒度曲线作为气候代用指标^[2];冰芯中的氢氧同位素与降水时的温度具有直接关系,冰芯中的冰晶形态随冰岩芯深度的变化可以反映古气候变化信息,对冰芯气泡中气体成分的恢复可以作为古大气成分及其变化研究的依据,冰层内沉积的大气气溶胶和微生物可以反映大气环流和生物地球化学循环^[3];洞穴碳酸钙沉积层(石笋、钟乳石等)能够保存系统、连续的同位素、微量元素以及年龄信息^[4];湖泊沉积物能够记录地质历史时期区域气候、植被以及人类活动的演化轨迹^[5];罗布泊盐湖沉积物成分变化可以作为气候冷暖演化的依据^[6];孢粉是地质时期古植被和古气候信息的可靠载体^[7];树轮中的同位素可以为大气中CO₂浓度及其它气候因子的变化提供间接的指示作用^[2]。但是,上述信息载体具有一个共同点,即形成、存在需要相对封闭、不存在剧烈变动的沉积环境,例如:湖泊沉积物的形成需要汇水域小、沉积速率大、水体相对较浅的沉积盆地;洞穴沉积物(石笋、钟乳石等)存在于人迹罕至、地点隐蔽的岩溶洞;冰芯多存在于深海、冰川。荒漠地区气候常年干燥、降水稀少、植被缺稀、物理风化强烈、风沙活动频繁,难以发现常规研究手段所需要的古气候环境信息载体。

荒漠是地球表层系统的重要组成部分之一,荒漠化的出现是气候变化与人类活动的双重因素综合作用的结果。荒漠化过程以植被破坏和土壤侵蚀为主要特征,区域气候因此发生变化,脆弱的干旱区生态系统受到显著影响,形成植被覆盖率降低~地表反射增强/土壤含水量降低~降水继续减少~植被覆盖率进一步降低的恶性循环。Franchito 和 Rao (1992)曾通过对荒漠化过程的模拟,证明荒漠化对

自然环境的影响并不仅限于荒漠化发生的地区：在荒漠化开始后，当地的净辐射、土壤湿度、蒸发和降水出现降低，地表及近地表的温度开始升高，而非荒漠化区域的温度和降水同时受到影响^[8]。因此，寻找合适的古环境信息载体测定气候变化信息，重建荒漠地区历史气候变化序列，对研究荒漠化与气候变化之间的反馈机制和完善全球气候变化科学体系具有重要的意义。红柳枯枝落叶所形成的、具有清晰层理构造的红柳沙包广泛分布于塔里木盆地各水源河下游河道两岸、三角洲、古河道以及局部洼地，对建立荒漠地区气候环境变化序列具有重要的意义。

1.2 研究目的与意义

1.2.1 研究目的

红柳对于干旱高温的沙漠地区环境具有良好的适应能力，由风成沙和红柳落叶枝叶叠加形成的层状结构中蕴含了大量的计年和气候环境变化信息^[9]。本文通过对位于塔克拉玛干沙漠南缘地区的三个红柳沙包沉积物剖面的沉积纹层系统采样和对比分析，对构成红柳沙包的物质组成及其所处区域的气候变化特征进行研究，尝试通过分析红柳有机质中 TOC、TC、C/N 与气候要素之间的相关关系，寻找红柳沙包有机质中 TOC、TC、C/N 的变化特点，讨论其所处区域气候要素的变化规律，并对塔克拉玛干沙漠南缘地区的近 200 年来的气候状况和红柳生长状况进行探讨。

1.2.2 研究意义

(1) 对红柳沙包作为高分辨率环境变化信息载体的功能进行进一步验证，继续挖掘其所包含的气候变化信息。

红柳多生长于干旱地区的湖盆边缘和河流沿岸，植株生命力顽强，耐风沙侵蚀，秋季脱落的枝叶经冬季风雪压实形成包含风沙物质的枯枝落叶层，即“年层”，“年层”经多年交替堆积可以形成高大的红柳沙包。斯文·赫定认为红柳沙包每千年可以长高 10m，亨廷顿则认为 15~19m 高的红柳沙包必定有 2000 年历史^[9]，红柳沙包中可以保存丰富的历史气候环境变化信息：沙层的厚度与当年的风沙强度和湿度关系密切；红柳中所含的植物有机质可以反映植物的生长状况及气温、降水等气候环境信息。结合 ¹⁴C 年代测定方法，可以为塔克拉玛干沙漠南缘地区的环境变化研究提供必要数据，揭示数百年来区域气候变化进程，弥补荒

漠地区高分辨率环境信息载体的不足,提供适用于荒漠地区的年代测定及古气候环境重建的标准。

(2)为塔克拉玛干沙漠南缘绿洲地区的生态变化和社会经济建设提供依据,为合理利用绿洲的水资源提供指引。

塔里木盆地的面积约为 $56 \times 10^4 \text{km}^2$,为我国最大的封闭性内陆盆地,围绕塔里木盆地周边地带形成一系列绿洲,成为典型干旱盆地生态环境脆弱带。绿洲为当地人民的生存和社会经济建设提供了必要的条件,但是人类活动的增加进一步对脆弱的绿洲生态系统产生了明显的影响:人口增加、社会生产扩大进一步加重环境承载力的负担;人工沟渠和人工水库使注入湖泊的河流和水系减少,而在干旱或半干旱地区气温和降水的微小变化就会引起水资源的显著改变^[10]。综上所述,塔克拉玛干沙漠南缘地区的气候重建研究对研究绿洲环境演化,促进生态保护,合理利用绿洲资源提供了必要的依据,对绿洲资源的可持续发展利用具有重要的指示意义。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本文以塔克拉玛干沙漠南缘绿洲地区典型红柳沙包为研究对象,结合数理统计分析方法,在实地调查、采样和实验分析的基础上,对安迪尔地区 2 个采样点、策勒地区 1 个采样点的红柳沙包沉积纹层有机质 TOC、TN 和 C/N 数据,结合当地近 50 年来的气象记录资料和近 200 年来新疆地区气候变化的文献记录,探寻近 200 年来研究区域不同时期温度、降水的变化规律,总结红柳沙包沉积纹层有机质 TOC、TN、C/N 和大气 CO_2 之间的相关关系,讨论塔克拉玛干沙漠南缘地区气候干湿状况的演化。

本研究属于赵元杰教授承担的国家自然科学基金项目“罗布泊地区红柳沙包沉积纹层年代学与古环境指示意义研究”中部分研究内容,并得到该项目的资金支持。

1.3.2 研究方法

为了获得红柳沙包所记录的历史气候环境变化信息,必须对所采样品的有机质进行分析。本研究采用实地调查和室内分析结合的研究方法:实地调查包括对

研究地点的环境调查和采样点的沙包选择、测量及采样；室内分析工作侧重于对年层内所包含的植物有机质样品和沙物质进行实验分析，分别对三个采样点红柳沙包沉积纹层有机质的 TOC、TN 和 C/N 进行相关数据的对比，并以此为依据，结合研究区域气候记录资料，探讨历史气候环境的变化。

(1) 文献资料与野外调查相结合。收集安迪尔地区和策勒地区周边气象站的气候记录资料，对研究区域进行野外调查，确定具有代表性的红柳沙包进行定位观察，测量形态特征，对“年层”和气候环境待用指标分析样品进行采集。

(2) 室内样品分析处理。本此研究采用了意大利 Euro Vector 公司 EA3000 型元素分析仪,样品容器采用高纯锡囊。利用 CPA225D 型电子天平称取一定量的样品，封装完毕后在富氧的条件下，对试样进行燃烧分解，燃烧后释放出的碳、氮分别被氧化为二氧化碳和氮氧化物，通过还原铜（吸收多余氧气）后，氮氧化物被还原为氮气，氮气和二氧化碳进入色谱柱分离后。样品不确定度为 $11\%(K=3)$ &10Mg。C/N 比值由有机碳含量（TOC）除以总氮含量（TN）计算所得。

(3) 数据分析。对室内样品处理所获得的数据，提取相关参数，分析其变化规律。运用 Excel2010 和 SPSS19.0 软件，采用 Pearson 相关分析、线性回归分析、Kendall 秩次相关检验、对比分析等方法具体统计分析。

(4) 结果分析。根据所获得的数据结果，分析安迪尔地区和策勒地区红柳沙包沉积纹层的 TOC、TN 和 C/N 的变化趋势及其与气候环境要素之间存在的相关关系，借此推测近 200 年来塔里木盆地南部地区气候的演化规律，尝试寻找大气 CO₂ 浓度变化对研究区域气候变化和红柳生长的影响。

1.4 技术路线

在已有实验数据的基础上，本文将根据如下技术路线进行：

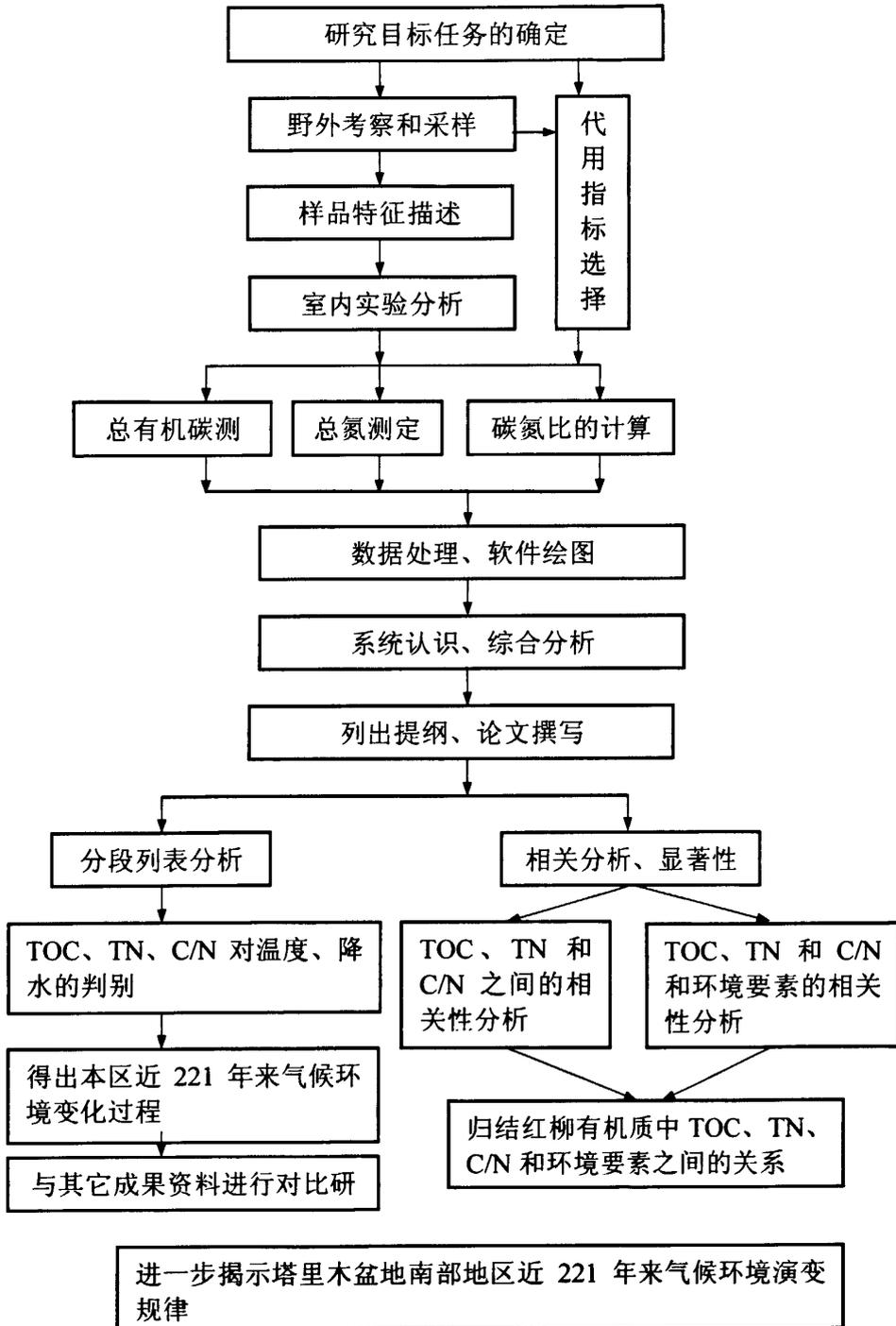


图 1 技术路线示意图

2 研究进展

2.1 红柳沙包的研究进展

红柳是干旱地区常见的多年生灌木，与风沙相互作用可以形成高大的红柳沙包，斯文·赫定和亨廷顿等人在进行新疆探险的过程中均对其有详细记载。夏训诚首先发现了红柳沙包年层的环境信息承载作用，并通过年代测定资料及历史文献对其可靠性进行了多次研究。

2.1.1 红柳沙包

红柳 (*Tamarix ramosissima* Ledeb)，别名乌柳、怪柳、多枝怪柳。分枝多，枝条呈现紫红或红棕色，叶片先端锐尖，稍显内弯，根茎具有旺盛的萌发能力。植株3月中旬至4月开始萌发，5月下旬至7月开花，花期延续到9月底至10月初，6月下旬结果，7月上旬成熟，冬季落叶。适宜条件下，幼龄期年平均生长高度可以达到50~80cm，4~5年后高达2.5~3m，10年生的植株可达到4~5m，直径7~8cm。

红柳耐旱、耐热，不喜阴蔽，适应干旱和高温，喜低湿而微具盐碱的土壤，主要生长在湖盆边缘和河流沿岸，群落覆盖度可以达到20%~30%至40%~70%。在塔里木盆地地下水位2~4m处、较湿润的盐渍化较轻的盐化草甸土和草甸盐土上，伴生有盐豆木，个别地段有残留的胡杨，还有长穗怪柳等几种怪柳，草本层常见的有芦苇、假苇拂子茅、小獐毛等，总覆盖度可以达到40%~70%。

红柳抗逆性强，根系深入土中吸收地下水，最深处可达10m以上。植株萌生力强：沙埋后可于根茎处生发不定根，枝条向上生长；因风蚀而暴露的根系，可以继续生长枝条。

红柳植株具有良好的风沙阻隔作用，每年11月开始落叶，脱落的枝叶与受红柳阻隔而沉积的沙面形成堆积层，经过冬天风雪压实，形成红柳枯枝落叶层，第二年就会被新的风沙层覆盖（图2）。随着时间推移，年层逐年叠加，最终堆积形成高大的红柳沙包，随着沙包高度的逐年增加，地下水位产生相对下降，最终红柳因为根部远离水源而干枯死亡，沙包停止生长，并最终受风蚀而消失。

红柳沙包年层中的组成物质蕴含丰富的气候环境信息。通过对沙层厚度、粒

级和矿物组成的分析，可以对不同时期风沙强度和物质来源的变化进行研究；通过对落叶的 C、H、N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 等同位素进行测定，可以描述不同时期 CO_2 、降水和温度等气候环境要素的变化^[11]。

红柳沙包的形成需要合适的条件：（1）存在丰富的沙源；（2）合适的水分条件；（3）合适的风速、空气湿度、冬季的降雪和霜冻等气象条件；（4）红柳叶自身所具有的特殊结构^[11]。塔里木盆地具备形成红柳沙包的理想条件：其中心为塔克拉玛干沙漠，具有丰富的沙源，夏季易出现风沙天气，沙粒受到红柳阻挡发生沉降；冬季风速较低，空气湿度为全年最大，落叶与风沙互层沉积，最终形成年层。

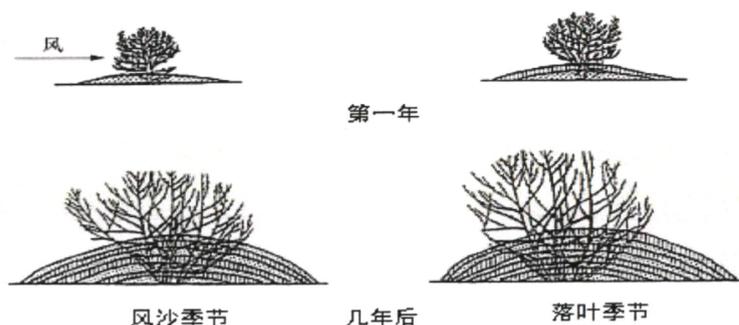


图 2 红柳年层的形成示意图

2.1.2 红柳沙包对环境变化信息的纪录作用

类似于树木年轮，红柳落叶和风成沙形成的沉积纹层存在清晰的层状构造，其中保存有丰富的环境变化信息。分析其中的组成物质，可以获得沙包测年及气候环境变化的参考数据，进一步揭示塔克拉玛干沙漠南缘近几百年来气候环境变化状况。

（1）红柳沙包的年代测定

获得准确的地质年代数据对研究过去气候环境变化具有重要意义。通常采用的气候环境信息载体包括树木年轮、珊瑚、湖相沉积物和洞穴沉积物等，采用的方法包括：湖相纹泥、 ^{210}Pb 、 ^{137}CS 和 ^{14}C 等，但由于荒漠地区特殊的地理环境状况，对研究其气候环境变化和年代测定需要尝试新的气候环境信息载体及与其相适用的测定方法，而红柳沙包中的所蕴含的丰富的环境信息，可以为荒漠气候环境演化研究提供崭新的方向。

(2) 红柳沙包对历史气候环境变化的指示意义

红柳沙包中主要包含两种物质：沙物质和红柳落叶有机质。对红柳沙包的沙层厚度、沙物质粒度及其矿物组成的测量，可以对不同时期的风沙强度及沙源地进行判断，而风沙起动临界风速与颗粒级配、沙层湿度、植被条件及起动方式等因素存在紧密联系^[9]；枯枝落叶可以反映出当年红柳的生长状况，而有落叶机质中的稳定同位素与区域气候环境变化之间存在密切关系，有机碳、氮可以反映植物的生长状况。因此，通过对稳定同位素和有机质的测定，可以揭示不同时期研究区域的气温、降水等气候环境因子的变化。

2.2 TOC、TN 及碳氮比 (C/N) 和大气 CO₂ 变化的研究进展

2.2.1 国内外对 TOC、TC 和 C/N 与气候变化的研究现状

碳、氮对有机体存在有着重要意义。碳元素约占构成有机体生命物质的 1/4，构成了有机体的生命基础，目前所发现的生命体均属于碳基生物；氮是构成有机体营养物质和遗传物质的主要元素，和碳元素共同构成核酸和蛋白质。碳和氮作为地表环境物质，共同参与生物地球化学循环，它们的含量变化和化学组合可以反映所处区域生态环境的发展特点^[12]。总有机碳和总氮是研究气候演化过程的常用代用指标：通过湖相沉积物中总有机碳和总氮的含量和碳氮比可以对沉积环境变化进行判别；总有机碳和总氮的含量可以对有机质生产力水平和气候条件的变化进行指示；C/N 值可以描述有机质的来源，浮游生物的 C/N 值低，一般小于 10，而陆生高等植物的 C/N 值较高，多在 20~200 之间变化^[13]，湖泊表层沉积物的碳氮比通常在 13~14 之间，对陆生维管植物和水生藻类对沉积物中有机质的贡献进行了指示^[14]；水体沉积物中有机质碳同位素组成由 C₃ 和 C₄ 植物控制，有机质碳同位素的反映古植被变化和古气候特征，有机质碳同位素值偏轻代表 C₃ 植物作为主要来源，气候温湿，偏重的有机质碳同位素代表了 C₄ 植物成为主要来源，气候干冷^[15]。

沉积物中有机碳、氮是生物埋藏于沉积物内经过生物分解或成岩作后的遗留物，其含量变化可以反映沉积物中输入的有机质的数量和湖泊的初始生产力，以及有机物的保存能力 (Meyers, 1997)，湖泊沉积物中的有机碳主要来源于水生植物和陆源植物碎屑，湖泊的初级生产力受到营养物质状况和温度控制，低温期的

延长、植物适宜生长时间的缩短、积温的减少、湖面冰封时间延长均可以导致湖泊水生植物光合速率降低、光合产量降低及有机质生产力降低。湖泊沉积物中有机质的含量可以反映气温的变化,对 Baikal 湖中的 TOC 的研究显示,TOC 可以对 13ka 以来湖泊生产力变化具有准确描述,随着冰川消失,森林开始发育,植被覆盖率逐渐提高,水体中藻类开始茂盛繁殖,TOC 含量得到增加 (Qiu et al., 1993) [14]; 青海湖的 TOC 含量可以记录湖泊有效湿度的变化,湿度增加,TOC 含量上升,反之则降低 (Xu et al., 2006) [14]; 湛江湖光岩玛珉湖的 TOC 含量对湖泊水位变化有良好的记录,冬季风力强劲,可以加速水体混合,湖底的有机质处于氧化环境阻碍 TOC 的保存,TOC 含量的变化可以间接反映冬季风的变化 [14]。高学鲁等人尝试利用 TN 对南沙群岛西部海域有机物的来源进行估算 [16]。

在本文研究中,我们尝试分析 TOC、TN 和 C/N 与温度、降水和大气 CO₂ 浓度变化的相关关系,判断塔克拉玛干沙漠南缘地区近 200 年来的气候变化信息。

2.2.2 植物中 C、N 及 C/N 分配与环境变化的相关研究现状

(1) 环境变化对植物体内碳分配的影响

工业革命以来,受人类活动的影响,大气中 CO₂ 的浓度出现明显上升趋势,而就目前所观测的数据显示,CO₂ 的上升趋势将进一步持续下去。作为光合作用的原料,CO₂ 直接作用于植物的生长。在实验室条件下,对植株进行短期 CO₂ 高浓度处理,光合作用将出现显著的提高,但是光合速率最初的促进会随着时间延长而消失,并且合作用的最适温度随着 CO₂ 浓度的增加而升高,对于同一气候环境中的植物,C₄ 植物光合作用的最适温度高于 C₃ 植物,在最适温度下的光合速率也要超过 C₃ 植物。

在自然条件下,天然生长的植物不可能遭受短期的 CO₂ 浓度突然增加,自然界中各种复杂的环境因素会对植物产生多方面的复杂影响,不同种类的植物也会表现出不同反映。大气温度升高,CO₂ 对植物光合作用的促进开始消失,高 CO₂ 浓度下生长的水稻、棉花叶片在温度上升后出现光合适应,光合过程对 CO₂ 的敏感性降低,在高 CO₂ 浓度条件下,温度继续升高植物体将产生对光合作用的反馈抑制 [17]。许振柱等在研究 CO₂ 浓度倍增和土壤干旱对幼龄沙生灌木碳分配的影响中发现,土壤干旱条件下,CO₂ 浓度倍增不能改变两种沙生灌木(柠条、

羊柴)叶片的光和状况,而水分充足情况下,CO₂浓度倍增可以增加土壤生物量,但这种效应会随着土壤干旱而减弱。在同一干旱条件下,CO₂浓度的倍增对柠条在同一干旱强度下的生长出现了促进作用。因此,CO₂浓度的倍增对干旱导致的植物生产力下降存在缓解作用,但具体效果因种类而异^[18]。

CO₂浓度升高促进了植物“源”器官的光合产物向“库”器官转移。未遭受干旱时,CO₂倍增对根冠比无显著影响,但受到干旱胁迫却显著地促进根冠比的增加^[18]。高CO₂浓度条件下植物碳分配具有随CO₂浓度增加而明显改变的趋势,对于小麦而言,碳分配给地下部根更多一些,而在黑麦草上则没有此规律,对于C₄植物来说,如百慕草,碳分配随CO₂浓度升高变化并不明显^[19]。CO₂的升高新叶、分蘖和叶面积增大具有促进作用,并且促进作物的光合作用增强,干物质增加,CO₂增加对小麦地上部干物质积累的贡献大于地下部分,这一状况在生育后期越发显著^[17]。CO₂浓度升高后,叶片气孔导度降低,蒸腾作用下降,植物生长和叶片伸展速度加快,植株高度和叶面积增加,蒸腾作用增加,根系形态改变,次生根数量和土表根系数量增加,根系发达,CO₂浓度升高可以促进小麦幼苗根系分枝^[20]。

(2) 环境变化对植物体内氮分配的影响

大气中CO₂浓度上升会影响到植物体的各个方面,而光合作用的变化只是其中一方面。大气CO₂浓度升高对氮素吸收的影响与大气CO₂浓度、植物品种和氮的形态有关,CO₂浓度升高促进植物对氮素的吸收^[21],植物对无机氮提取和吸收均出现加速:研究显示,对根际进行富含CO₂的处理,使水培番茄对硝态氮吸收增加30%,而对铵态氮吸收无影响;许振柱等人对羊草的研究发现叶片的氮素含量与水分利用率(WUE)呈显著的正相关,在干旱情况下,高温对光合器官的伤害作用加重,叶片氮素水平下降,光合能力受到削弱,干旱和高温的共同作用导致植物的固碳能力下降,而在夜间温度增加,日较差缩减,会使叶片、鞘等地上部分的氮素含量出现减少趋势,但是地下部分出现相反现象^[22]。也有实验显示,在陆地生态系统氮循环过程中,植物残体的氮浓度和残枝量发生改变,而草原生态系统氮循环的过程中则不受到CO₂浓度升高的影响^[21]。

(3) 环境变化对植物体有机质 C/N 的影响

C/N 常常被用来描述植物的生长量。许多研究表明大气 CO₂ 浓度升时, 植物及土壤中的碳氮比发生变化。Jastrow 等指出, CO₂ 浓度升高时, 地表 5cm 的牧草残体和微粒状有机质的碳氮比增加, 而地下茎和根的碳氮比没有受 CO₂ 浓度变化的强烈影响, 15cm 粉砂质粘土片层碳氮比有一个轻微但明显的增加^[21]; Gifford 等指出, 植物活组织中碳氮比的变化不存在明显规律, 但平均上升 15%^[21]。在 CO₂ 浓度升高条件下, 地上部分生物量累积增加, 凋落物量将随之增加, 生长的叶片也会发生某些化学成分的改变, N 含量表现出下降趋势, 棉花 C/N 在 CO₂ 浓度倍增条件下提高 21%~23%, 小麦、玉米等生长在高 CO₂ 浓度下的植物 C/N 均有不同程度的增加^[23]。同时, 化学成分的改变将会使凋落物的分解速率发生改变, 一般认为 CO₂ 浓度升高会降低植物残体的腐解速率, Lambers 认为在营养胁迫环境中 CO₂ 浓度倍增导致 C/N 的增加, 降低植物残体腐解速率^[23]。

综上所述, 大气中 CO₂ 浓度上升导致了气温的上升和部分地区降水量的增加, 各种环境因素的共同作用将导致红柳中 C、N、C/N 的变化, 从而反映环境温度和气候干湿状况的变化。

3 研究区域概况

3.1 基本情况

在本文研究中,红柳沙包的3个采样点分别位于塔里木盆地南缘民丰县的安迪尔古城、安迪尔牧场和策勒县的达玛沟乡(如图3)。

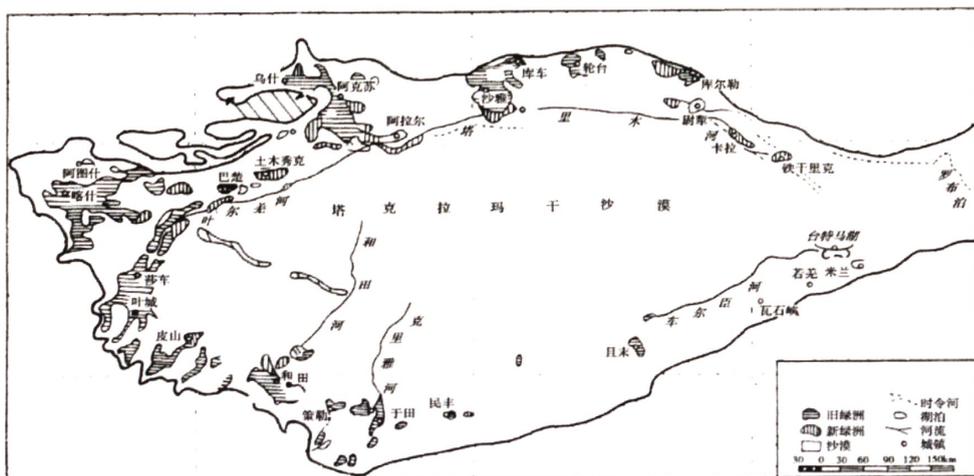


图3 研究区域基本情况示意图

塔里木盆地坐落于我国新疆南部,为阿尔金山、昆仑山、喀喇昆仑山、天山等山脉环绕,在其中心地带坐落着我国最大的沙漠——塔克拉玛干沙漠。塔克拉玛干沙漠基本由流动沙丘构成,总面积约33万平方公里。发源于周围山脉的河流呈向心状汇注并消失于盆地,仅有个别河流可以横穿盆地^[24]。

塔里木盆地经过长期海陆变迁和盆山耦合作用形成,自上新世以来,青藏高原及其他山地隆升,对盆地的环境格局产生重大影响,盆地中心逐渐荒漠化,风成沙堆积面积扩大;第四纪时,干旱加剧,塔克拉玛干沙漠开始形成;天然绿洲在盆地周围和河流流域相伴而生,从而奠定了今天塔里木盆地的环境格局^[25]。盆地为典型极端干旱区,大陆性气候明显,内部干旱多风,降水多集中于夏季,冬季湿度较大,河流的补给依赖于周围山系的冰川融水。植被以红柳灌丛、灌木和多汁木本盐类植物为主,天然绿洲中分布有胡杨和灰杨组成的荒漠森林,流动沙丘上只有红柳、芦苇等覆盖,由于水资源缺乏且补给不稳定,盆地中形成了以绿洲为基础,相对封闭、独立的脆弱生态系统^[25]。

策勒绿洲 (36°00'N、80°47'E) 海拔 1380m, 面积 5333.3km², 占策勒县总面积的 1.6%; 其形成与发展完全依赖策勒河水。策勒河是一条典型的内陆河流, 属于冰雪融水和雨水混合补给为主的河流; 每年 6~8 月 (夏季) 为全年径流量最大的三个月, 而 1~3 月 (冬季) 则为径流量最小的 3 个月^[26]。

安迪尔绿洲 (37°55'N、83°48'E) 海拔 1300m, 面积 1187.3km², 其形成与发展依赖于流经境内的安迪尔河下游泉水的溢出补给。安迪尔河发源于昆仑山, 上游河水沿河床大量入渗, 中游为季节性河床, 下游属于一年四季以地下水补给的泉水溢出补给性河流。每年 3~4 月 (春季) 是全年水量最大的季节, 9~11 月 (秋季) 则是全年水量最小的季节^[27]。

3.2 水资源情况

塔里木盆地河流发源于昆仑山、天山南麓和阿尔金山北麓, 汇入盆地后形成九大水系。出山口以下年径流量在 $20 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上的河流有 7 条, $5 \sim 10 \times 10^8 \text{m}^3$ 之间的河流有 3 条, $1 \sim 5 \times 10^8 \text{m}^3$ 之间的有 27 条。以年径流量 $0.1 \times 10^8 \text{m}^3$ 为下限, 汇入塔里木盆地的总径流量为 $354.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。阿克苏河、叶尔羌河及和田河汇流成塔里木河^[28]。

塔里木盆地地下水的流向与沙漠地形保持一致, 存在从南向北、从东向西的流向。地下水的形成主要依靠以下 3 种方式: (1) 发源于昆仑山的河流流经山前平原时渗入地下; (2) 河流流经沙漠的过程中对地下水进行补给; (3) 沙漠中的降水转化为地下水。

3.3 影响塔里木盆地环境演化的因素

塔里木盆地位于大陆腹地 (37°~41°N, 75°~91°E), 受到青藏高原、帕米尔高原和天山山脉隆起而产生的影响, 盆地四周被山脉围绕, 来自海洋的湿润水汽难以到达; 大气环流受地形影响而改变, 形成西风带及西伯利亚高压脊, 从而出现干燥多风的气候, 中纬度效应进一步导致了塔里木盆地内部干旱少雨的气候特点。受以上因素影响, 自上新世以来, 塔克拉玛干沙漠在盆地中心开始形成, 而沙漠边缘的绿洲则随着沙漠的扩大开始萎缩, 同时青藏高原隆起带来雪线上升和河谷下切, 注入河流的水量开始减少, 河流流域逐渐缩减。进入 20 世纪后, 社会稳定, 人口数量开始增加, 人类活动对盆地的影响逐渐加大, 经过农业垦荒、

水利工程和植树造林,人工绿洲面积得到增加,绿洲相对封闭、脆弱的生态环境遭到破坏,蓄水工程导致河流下游水量减少,河道开始干涸,绿洲面积萎缩^[25]。

3.4 气候变化特征分析

本研究中所采用的气象记录资料来源于策勒气象站和安迪尔气象站从 1960 年~2011 年的气温、降水和湿度等要素的逐月观测记录,并采用 Kendall 秩次相关检验、Pearson 相关分析和线性倾向估计对研究区域的气候因子变化特征进行描述。

(1) 气温

在过去的 52 年中,策勒地区和安迪尔地区气温整体上存在波动式上升趋势,其线性倾向率分别为 $0.436^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.597^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (如图 4)。其中,策勒绿洲的气温线性方程为: $y=0.0436x-74.179$, 统计量 $F=56.658$, $p=0.000<0.05$; 安迪尔绿洲的气温的线性方程为: $y=0.0597x-107.31$, $x=1, 2, \dots, n$, 统计量 $F=74.643$, $p=0.000<0.05$ 。式中: y 表示年平均气温, x 表示时间。线性回归检验显示,两处绿洲的气温存在明显的线性增加趋势。

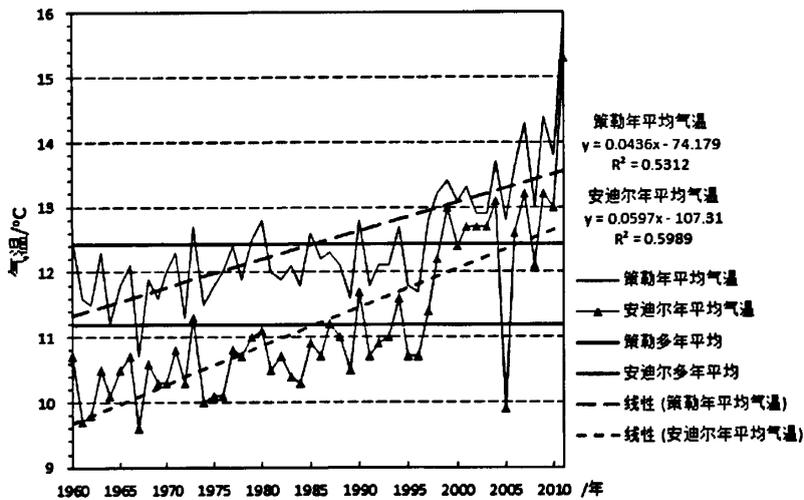


图 4 年平均气温年际变化曲线

(2) 降水

近 52 年来策勒地区和安迪尔地区的降水存在波动上升趋势 (如图 5), 线性倾向率分别为 $3.294\text{mm}/10\text{a}$ 和 $7.403\text{mm}/10\text{a}$, 其中策勒绿洲的降水线性方程为: $y=0.342x+29.695$, 统计量 $F=1.760$, $p=0.191>0.05$, 其线性变化趋势不显著; 安

迪尔绿洲的降水线性方程为： $y=0.7442x+9.7604$ ，统计量 $F=12.728$ ， $p=0.001<0.05$ ，因此安迪尔绿洲年降水存在明显的线性增加趋势。式中： y 表示降水量， x 表示时间， $x=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 湿度

两处绿洲相对湿度的线性倾向率分别为 $-0.119\%/10a$ 和 $-0.356\%/10a$ (如图5)。策勒地区相对湿度线性方程： $y=-0.0119x+64.628$ 统计量 $F=0.152$ ， $p=0.698>0.05$ ；安迪尔地区线性方程为： $y=-0.0356x+110.51$ ，统计量 $F=2.407$ ， $p=0.127>0.05$ ，式中： y 表示降水量， x 表示时间， $x=1, 2, \dots, n$ 。两处地区湿度的线性变化趋势均不显著。

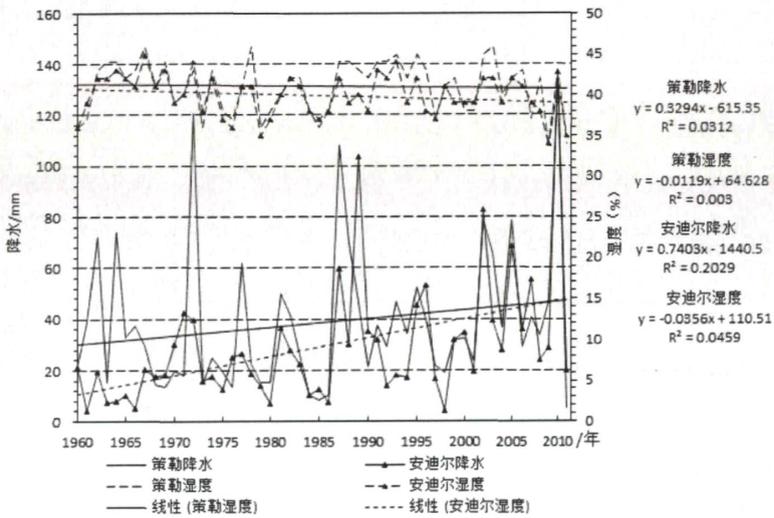


图5 年降水量和相对湿度变化曲线

4 红柳沙包样品的采集与分析

4.1 样品采集与处理

4.1.1 样品采集

本文研究于 2011 年 6 月对所需的红柳沙包样品进行外野调查及样品实地采样。于 2011 年 6 月 18 日、19 日、20 日，分别对以下 3 个采样点进行了红柳沙包样品的野外采集和测量。

(1) A 样点位于新疆维吾尔自治区民丰县安迪尔古城，沙包高约 5m，剖面厚度 1.5m，共取样 88 层；(2) B 样点位于新疆维吾尔自治区民丰县安迪尔牧场南 10km 处，沙包高越 10m，剖面厚度 5.0m，共取样 107 层，采用 GPS 进行卫星定位，坐标为 37.83°N，83.71°E，海拔 1223 m；(3) C 样点位于新疆维吾尔自治区策勒县达玛沟乡北，沙包高约 14m，剖面厚度 4.5m，共取样 151 层，采用 GPS 进行卫星定位，坐标为 37.09°N，81.08°E，海拔 1318m。采样点位置详细分布如图 6：

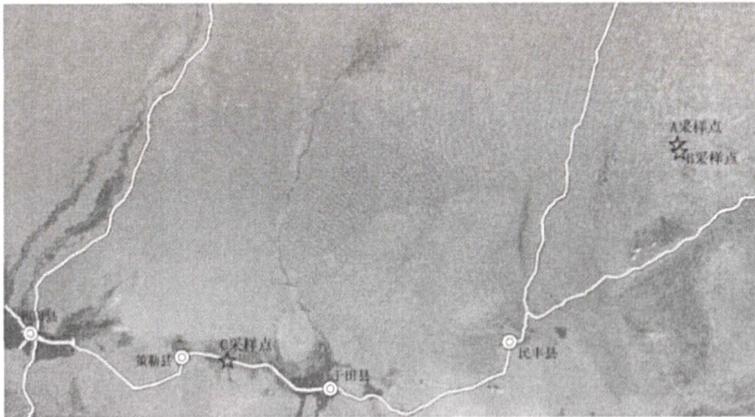


图 6 采样点示意图

针对合适的红柳沙包样品，采取以下步骤进行试验样品采集：

- (1) 定位：使用 GPS 定位仪对选取的采样点位置进行精确定位；
- (2) 清理：对沙包背风坡一侧纵向清除表面浮土，使“年层”清晰可见；
- (3) 淋洗：使用纯净水对暴露在外的剖面进一步清洗；

- (4) 分层：对“年层”层理纹层进行定位分层，逐层测量厚度并详细记录；
- (5) 取样：对划定的取样层进行取样，将样品进行编号密封；
- (6) 记录：取样结束后测量并记录剖面厚度。

4.1.2 样品处理

在实验室中将样品过筛，分离红柳枯枝落叶与沙物质，标记后备用。实验主要分析红柳沙包沉积纹层有机质中 TOC 和 TN 含量。实验步骤如下：

(1) 对于编号后的样品采用去离子水进行清洗，清洗后的样品转移至烧杯中用去离子水浸泡 10 个小时；吸去多余去离子水后，利用烘箱烘干，对烘干后的样品进行研磨；

(3) 研磨后样品经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：采用意大利 EuroVector 公司的 EA3000 元素分析仪，样品容器采用高纯锡囊，使用 PA225D 电子天平称取一定量的样品，封装后在富氧条件下高温燃烧分解，有机质中碳、氮分别以二氧化碳和氮氧化物形式释放，通过还原铜（同时吸收过量氧气）后，氮氧化物还原为氮气，氮气和二氧化碳进入色谱柱分离，利用热导检测器检测，不确定度为 11% (K=3) & 10Mg。

4.2 样品参数测定及处理结果

4.2.1 沉积纹层年代的确定

为了建立红柳沙包层级纹层的年代序列，本文分别采用年层计年、 ^{14}C 、 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 年代测定相结合的方法，得到如下结果：

(1) 经过北京大学加速器质谱实验室进行 ^{14}C 年代测定，得到的结果如表 1：

表 1 红柳沙包 ^{14}C 年代测定

Lab 编号	样品	样品源	采样土地点	碳 14 年代 (BP)	误差 (a)
BA111844	红柳	A88	安迪尔古城	145	30
BA111847	红柳	B106	安迪尔牧场	350	35
BA111851	红柳	C151	达玛沟乡	360	30

(2) 采样点的沉积纹层中沙物质的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 经过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进行年代测定，其中在 A 样点，1980 年

对应于 23cm 深度；在 B 样点，1980 年对应于 35cm 深度；在 C 样点，1980 年对应于 38cm 深度。

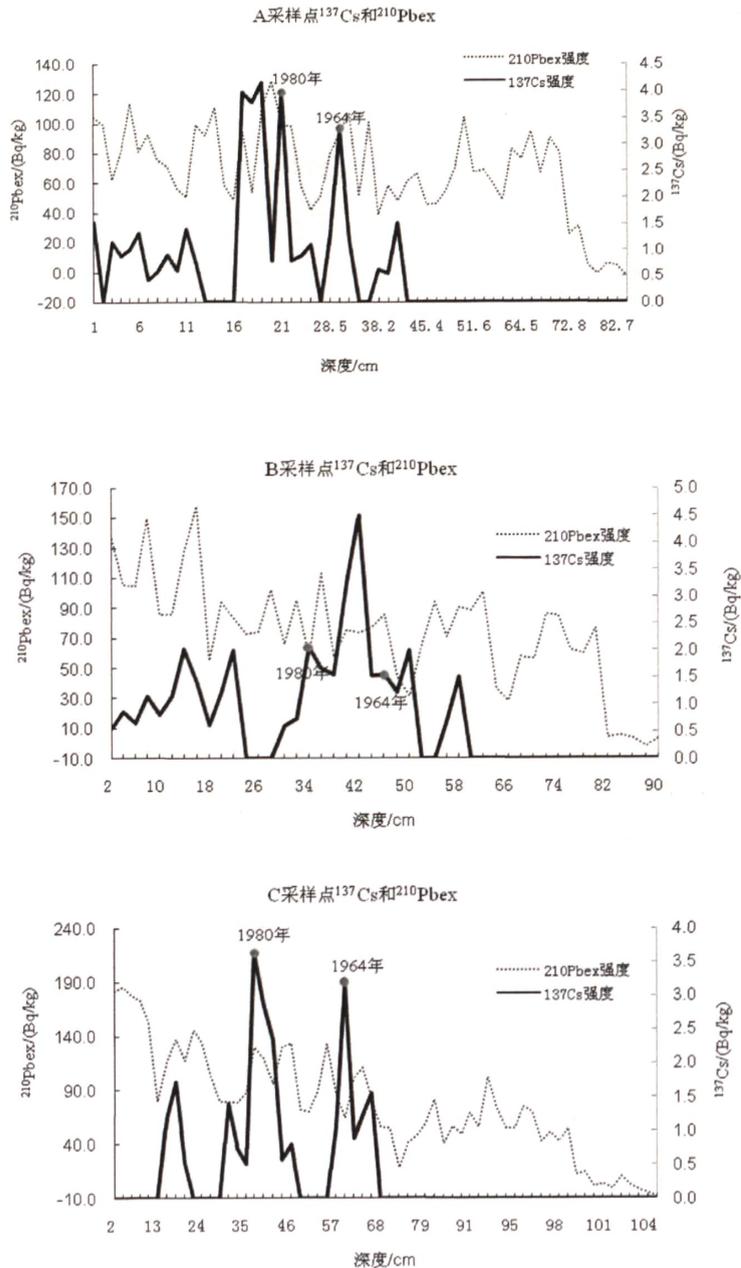


图 7 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代测定结果

(3) 根据对本文研究中红柳沙包中枯枝落叶层中的阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) 总量进行纹层年代的推断。干旱导致的水分胁迫会对植物细胞渗透压产生

直接影响，为了应对干旱产生的土壤缓慢水分胁迫，红柳中 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等无机离子会发生主动积累^[29]，而当红柳大量吸水后，水分胁迫解除，阳离子总量将会下降，经过一年的生长，枝叶掉落后形成枯枝落叶阳离子的总量显示降低。因此，根据安迪尔地区和策勒地区 1960~2011 年的气象资料记录，采用气候异常的概念对年降水量变化进行分析：如果某年降水量为 P ，满足下式则认为该年降水量异常： $|\Delta p_i| = |p_i - \bar{P}| \geq 2\delta$ ，公式中： δ 为降水量的均方差， \bar{P} 为降水系列的平均值^[30]。经过计算，策勒地区 $\bar{P}=38.64\text{mm}$ ， $2\delta=56.50$ ，在 52 年中，1972 年、1987 年和 2010 年出现降水量异常偏多，没有出现降水量异常偏少的年份；安迪尔地区 $\bar{P}=29.45\text{mm}$ ， $2\delta=49.82$ ，在 52 年中，1989 年、2002 年和 2010 年降水量异常偏多，没有出现降水量异常偏少的年份。比对红柳沙包落叶阳离子总量变化（图 8）可以发现：

（1）采样点 A（安迪尔古城）在 1989 年发生降水偏多后，1989~1990 年的年层中阳离子总量出现明显降低；2002 年发生降水偏多后，2003~2004 年的年层中阳离子总量出现明显降低；2010 年发生降水偏多后，2010~2011 的年层中阳离子总量出现明显降低。

（2）采样点 B（安迪尔）在 1989 年发生降水偏多后，1988~1989 年的年层中阳离子总量明显偏低；2002 年发生降水偏多后，2001~2002 年的年层中阳离子总量明显偏低。

（3）采样点 C（策勒）在 1972 年发生降水偏多后，1972~1973 年的年层中阳离子总量出现下降现象；1987 年发生降水偏多后，1987~1988 年的年层中出现阳离子总量下降现象；2010 年出现降水偏多，在 2010~2011 的年层中阳离子出现下降现象。

根据以上的分析，我们可以发现在发生降水异常偏多后，研究区域红柳植株落叶中吸收阳离子总量出现了明显的降低。

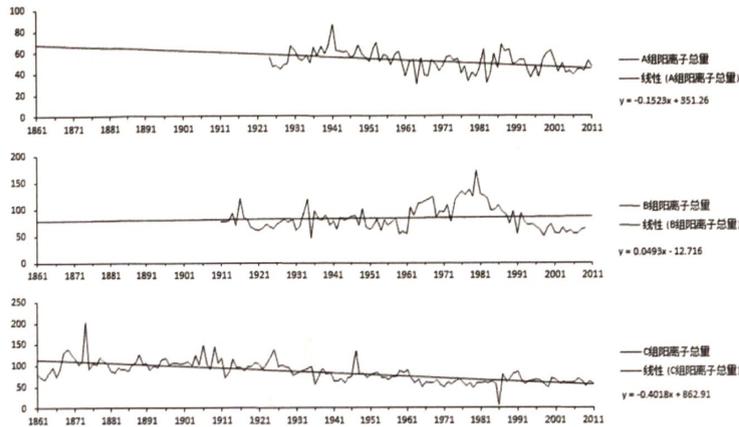


图 8 红柳落叶层阳离子总量

4.2.2 TOC、TN、C/N 测定结果

(1)A组: TOC 含量最大值为 49.054%, 最小值为 26.062%, 平均值为 41.306%, 最大值出现在 1792 年, 最小值出现在 1838 年; TN 含量最大值为 2.423%, 最小值为 0.455%, 平均值为 0.930%, 最大值出现在 1812 年, 最小值出现在 2009 年; C/N 含量最大值 82.76, 最小值为 17.77, 平均值为 48.25, 最大值出现在 1998 年, 最小值出现在 1983 年。

(2)B组: TOC 含量最大值为 47.272%, 最小值为 21.218%, 平均值为 37.985%, 最大值出现在 2010 年, 最小值出现在 1943 年; TN 含量最大值为 3.767%, 最小值为 0.634%, 平均值为 1.844, 最大值出现在 1937 年, 最小值为 1863 年; C/N 含量最大值 65.66, 最小值为 10.47, 平均值为 24.18, 其中最大值出现在 1863 年, 最小值出现在 1937 年。

(3)C组: TOC 含量最大值为 50.926%, 最小值为 28.785%, 平均值为 37.033%, 最大值出现在 1907 年, 最小值出现在 1991 年; TN 含量最大值为 2.198%, 最小值为 0.663%, 平均值为 1.477%, 最大值出现在 1970 年, 最小值为 1993 年; C/N 含量最大值 58.40, 最小值为 16.33, 平均值为 26.16, 最大值出现在 1993 年, 最小值出现在 1954 年。

5 样品数据的分析结果与讨论

5.1 TOC、TN、C/N 测定结果的分析

由于本文实验中所获得数据存在缺失值，因此利用 SPSS 软件，采用线性插值法对缺失值进行补足。

插值后，A 采样点 TOC 时间序列的相关性系数由 0.112 增加为 0.132，TN 序列的相关系数由-0.555 降低为-0.562；B 采样点 TOC 时间序列的相关性系数由 0.245 增加为 0.256，TN 序列的相关系数由 0.264 增加为 0.283；C 采样点 TOC 时间序列的相关性系数由 0.131 增加为 0.147，TN 序列的相关系数由-0.159 降低为-0.162。3 组数据进行缺失值补足后其变化序列的相关性未发生明显变化。

5.1.1 TOC、TN、C/N 测定结果的相关性分析

采用 Kendall 秩次相关检验对经过插值后的 TOC、TN、C/N 时间序列进行相关性分析：

(1) 在 A 组样品中，红柳落叶有机质中 TOC 序列的相关性系数为 0.132， $p=0.004<0.05$ ，存在显著的正相关关系；TN 序列的相关性系数为-0.562， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的负相关关系，C/N 序列的相关性系数为 0.584， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的正相关关系；

(2) 在 B 组样品中，红柳落叶有机质中 TOC 序列的相关性系数为 0.256， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的正相关关系；TN 序列的相关性系数为 0.283， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的正相关关系，C/N 序列的相关性系数为-0.177， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的负相关关系；

(3) 在 C 组样品中，红柳落叶有机质中 TOC 序列的相关性系数为 0.147， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的正相关关系；TN 序列的相关性系数为-0.162， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的负相关关系，C/N 序列的相关性系数为 0.212， $p=0.000<0.05$ ，存在显著的正相关关系。

根据以上分析，三组样本中的 TOC、TN 和 C/N 序列均存在随时间变化的显著趋势。

5.1.2 TOC、TN、C/N 测定结果的线性分析

进一步采用 SPSS 软件对经过插值后的 TOC、TN、C/N 序列进行线性回归分析，结果见图 9。

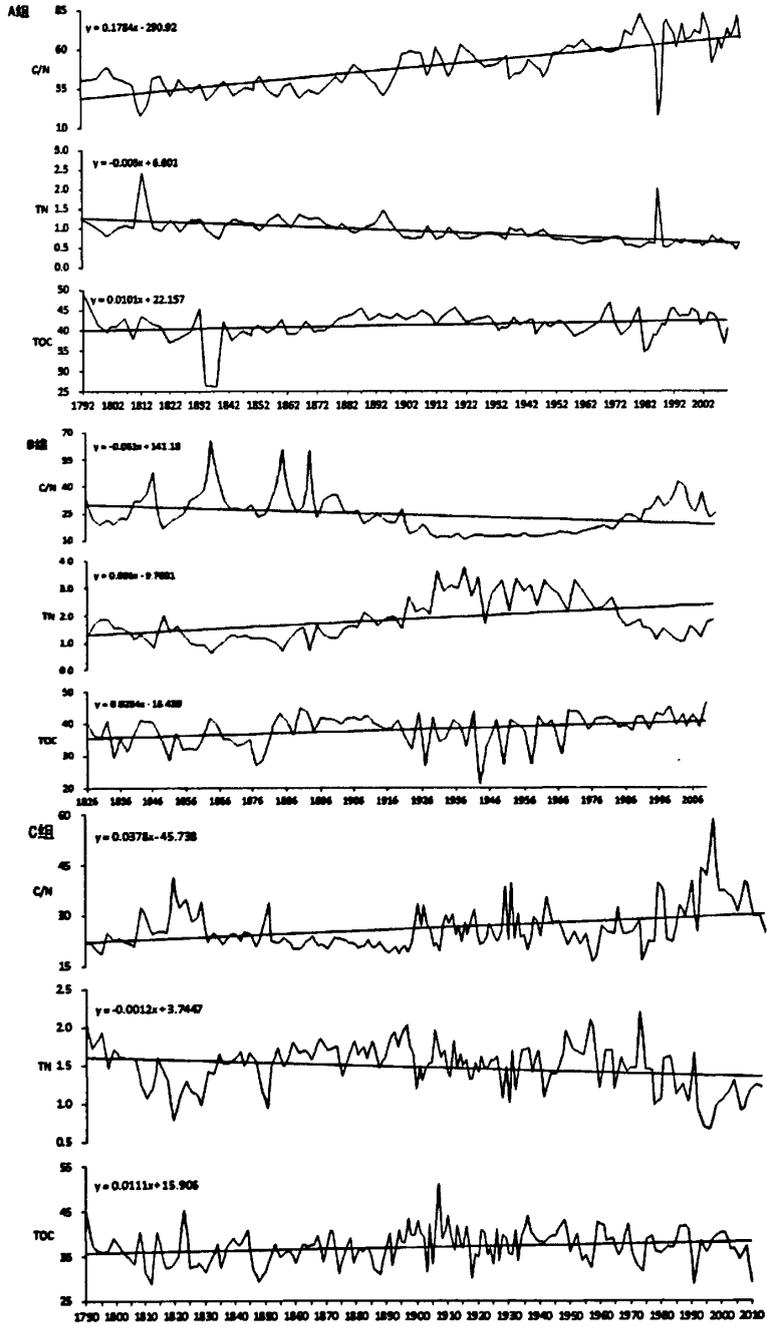


图 9 TOC、TN、C/N 的测定结果

(1) 在 A 组样品中(图 9), TOC 的倾向值为 0.101%/10a, 统计量 $F=8.806$, $p=0.003<0.05$, 存在明显的线性关系; TN 的倾向值为 -0.03%/10a, 统计量 $F=170.814$, $p=0.000<0.05$, 线性关系极为显著; C/N 的倾向值为 1.784/10a, 统计量 $F=376.319$, $p=0.000<0.05$, 线性关系极为显著;

(2) 在 B 组样品中(图 9), TOC 的倾向值为 0.284%/10a, 统计量 $F=25.20$, $p=0.00<0.05$ 线性关系显著; TN 的倾向值为 0.06%/10a, 统计量 $F=42.25$, $p=0.00<0.05$, 线性关系显著; C/N 的倾向值为 -0.61/10a, 统计量 $F=19.70$, $p=0.00<0.05$, 线性关系显著。

(3) 在 C 组样品中(图 9), TOC 的倾向值为 0.111%/10a, 统计量 $F=9.463$, $p=0.002<0.05$, 线性关系明显; TN 的倾向值为 -0.012%/10a, 统计量 $F=16.250$, $p=0.000<0.05$, 线性关系显著; C/N 的倾向值为 0.378/10a, $F=37.32$, $p=0.000<0.05$, 存在显著的线性关系。

综上所述, 在三处采样点中, A 组和 C 组红柳落叶有机质中的 TOC、C/N 均存在显著的逐年上升趋势, TN 存在明显的逐年下降趋势; B 组 TOC 和 TN 含量均存在明显的逐年增加趋势, C/N 则呈现明显的下降趋势。

5.1.3 TOC、TN、C/N、大气 CO₂ 浓度和气候要素的相关性分析

为了进一步验证红柳沙包作为环境信息载体对气候要素变化的指示作用, 并且寻找塔克拉玛干沙漠南缘红柳沙包有机质中 TOC、TN 和 C/N 变化的影响因素, 我们采用安迪尔地区和策勒地区从 1960~2010 年的气象记录资料, 采用 Pearson 相关性检验对这一时期中红柳落叶有机质中 TOC、TN、C/N 和大气 CO₂ 浓度与降水、气温等气候因素之间相关性进行分析(如表 2), 判断生境变化对红柳生长状况的影响(加*的数据表示通过 0.05 信度水平的检验, 加**的数据表示通过 0.01 信度水平的检验)。

在 A 组样本(安迪尔古城)中:

(1) TN 与 C/N 存在显著的负相关关系, 相关系数为 -0.897; TN 和 TOC、降水量、年平均气温、大气 CO₂ 浓度、湿度的相关系数分别为 -0.240、-0.069、-0.158、-0.097 和 0.126, 均未通过信度检查;

(2) TOC 和 C/N 存在显著的负相关关系, 相关系数为 -0.320; TOC 和降水

量、年平均温度、湿度、大气 CO₂ 浓度的相关系数分别为 0.038、0.166、0.160 和 0.150，均未通过信度检查；

(3) C/N 和降水、年平均温度、湿度、大气 CO₂ 浓度的相关系数分别为 0.038、0.228、-0.193 和 0.211，均未通过信度检查；

(4) 在气候要素中，降水量与年平均温度、大气 CO₂ 浓度成存在显著的正相关关系，相关系数分别为 0.319 和 0.494；年平均温度与大气 CO₂ 浓度存在十分显著的正相关关系，相关系数为 0.799；湿度和降水、年平均温度、大气 CO₂ 浓度的相关系数分别为 0.143、-0.254 和 -0.157，均未通过信度检查。

在 B 组样本（安迪尔牧场）中：

(1) TN 和 C/N 存在显著的负相关关系，相关系数为 -0.926；TN 和 TOC、湿度的相关系数为 -0.052 和 0.031，均未通过信度检查；TN 与降水量、年平均气温、大气 CO₂ 浓度存在显著的负相关关系，相关系数分别为 -0.278、-0.579 和 -0.825；

(2) TOC 和 C/N、降水、年平均温度和大气 CO₂ 浓度存在显著的正相关关系，相关系数分别为 0.302、0.406、0.375 和 0.340；TOC 和湿度的相关系数为 -0.179，未能通过信度检查；

(3) C/N 和年平均温度、大气 CO₂ 浓度间存在显著的正相关关系，相关系数分别为 0.664 和 0.804；C/N 和湿度的相关系数为 -0.038，未通过信度检查；

(4) 在气候环境要素中，降水和年平均温度、大气 CO₂ 浓度存在显著的正相关关系，相关系数分别为 0.319 和 0.494，降水和湿度的相关系数为 0.143，未能通过信度检查；年平均温度和大气 CO₂ 浓度存在显著的正相关关系，相关系数为 0.799；湿度和、年平均温度大气 CO₂ 浓度的相关系数为 -0.254 和 -0.157，均未能通过信度检查。

在 C 组样本（策勒地区达玛沟乡）中：

(1) TN 和 C/N、大气 CO₂ 浓度均存在显著的负相关关系，相关系数分别为 -0.912 和 -0.540；TN 与 TOC、降水量、年平均气温、湿度的相关系数分别为 0.126、-0.081、-0.205 和 -0.209，均未能通过信度检验；

(2) TOC 和 C/N、降水、年平均温度、湿度、大气 CO₂ 浓度的相关系数分别为 0.146、-0.194、-0.155、-0.133 和 -0.216，均未能通过信度检查；

(3) C/N和大气CO₂浓度存在显著的正相关关系,其相关系数分别为0.397; C/N和降水量、年平均温度、湿度的相关系数分别为-0.027、0.082、0.205,但是均未能通过信度检查;

(4) 在气候环境要素中,降水和年平均温度、大气CO₂浓度的相关系数分别为0.36和0.253,未能通过信度检查,降水和湿度存在显著的正相关关系,相关系数为0.417;年平均温度和大气CO₂浓度存在显著的正相关关系,相关系数为0.760,年平均温度和湿度存在显著的负相关关系,相关系数为-0.379;湿度和大气CO₂浓度的相关系数为0.012,未能通过信度检查。

表2 3组样品各参数和环境因素的相关系数表

(1) A样品各参数的相关系数表

参数	TN%	TOC%	C/N	降水量	年平均温度	湿度	大气CO ₂ 浓度
TN%		-0.240	-0.897**	-0.069	-0.158	0.126	-0.097
		0.090	0.000	0.630	0.267	0.379	0.498
TOC%	-0.240		0.320*	0.038	0.166	0.160	0.150
	0.090		0.022	0.793	0.245	0.263	0.292
C/N	-0.897**	0.320*		0.038	0.228	-0.193	0.211
	0.000	0.022		0.789	0.107	0.175	0.138
降水量	-0.069	0.038	0.038		0.319*	0.143	0.494**
	0.630	0.793	0.789		0.022	0.315	0.000
年平均温度	-0.158	0.166	0.228	0.319*		-0.254	0.799**
	0.267	0.245	0.107	0.022		0.072	0.000
湿度	0.126	0.160	-0.193	0.143	-0.254		-0.157
	0.379	0.263	0.175	0.315	0.072		0.271
大气CO ₂ 浓度	-0.097	0.150	0.211	0.494**	0.799**	-0.157	
	0.498	0.292	0.138	0.000	0.000	0.271	

(2) B 样品各参数的相关系数表

参数	TN%	TOC%	C/N	降水量	年平均温度	湿度	大气CO ₂ 浓度
TN%		-0.052	-0.926**	-0.278*	-0.579**	0.031	-0.825**
		0.716	0.000	0.048	0.000	0.827	0.000
TOC%	-0.052		0.302*	0.406**	0.375**	-0.179	0.340*
	0.716		0.031	0.003	0.007	0.208	0.015
C/N	-0.926**	0.302*		0.273	0.644**	-0.038	0.804**
	0.000	0.031		0.053	0.000	0.790	0.000
降水量	-0.278*	0.406*	0.273		0.319*	0.143	0.494**
	0.048	0.003	0.053		0.022	0.315	0.000
年平均温度	-0.579**	0.375**	0.644**	0.319*		-0.254	0.799**
	0.000	0.007	0.000	0.022		0.072	0.000
湿度	0.031	-0.179	-0.038	0.143	-0.254		-0.157
	0.827	0.208	0.790	0.315	0.072		0.271
大气CO ₂ 浓度	-0.825**	0.340*	0.804**	0.494**	0.799**	-0.157	
	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.271	

(3) C 样品各参数的相关系数表

参数	TN%	TOC%	C/N	降水量	年平均温度	湿度	大气CO ₂ 浓度
TN%		0.126	-0.912**	-0.081	-0.205	-0.209	-0.540**
		0.380	0.000	0.572	0.149	0.141	0.000
TOC%	0.126		0.146	-0.194	-0.155	-0.113	-0.216
	0.380		0.307	0.174	0.276	0.429	0.129
C/N	-0.912**	0.146		-0.027	0.082	0.205	0.397**
	0.000	0.307		0.853	0.568	0.148	0.004
降水量	-0.081	-0.194	-0.027		0.036	0.417**	0.253
	0.572	0.174	0.853		0.800	0.002	0.073
年平均温度	-0.205	-0.155	0.082	0.036		-0.379**	0.760**
	0.149	0.276	0.568	0.800		0.006	0.000
湿度	-0.209	-0.113	0.205	0.417**	-0.379**		0.012
	0.141	0.429	0.148	0.002	0.006		0.933
大气CO ₂ 浓度	-0.540**	-0.216	0.397**	0.253	0.760**	0.012	
	0.000	0.129	0.004	0.073	0.000	0.933	

通过对三组样本中红柳落叶所含的 TOC、TN、C/N 的相关性进行分析，我们可以得出下面判断：

(1) 在三组样本中，TN 的变化与降水和温度之间的相关系数均小于 0，B 组 TN 和降水之间存在着显著的负相关性；A 组和 B 组的 TN 与相对湿度之间的相关系数均大于 0，而 C 组的 TN 与相对湿度之间的相关系数则小于 0，但是均未能通过信度检验。

(2) 大气 CO₂ 浓度上升是引发气候因子改变的主要原因，而大气 CO₂ 浓度上升和气温增加之间的关系最为密切。在 A 组样本中，大气 CO₂ 浓度和降水、温度的相关性系数分别为 0.494 和 0.799，均通过了显著性水平为 0.01 的信度水平的相关性检测；在 B 组样本中，大气 CO₂ 浓度和降水、温度的相关性系数分别 0.494 和 0.799，均通过了显著性水平为 0.01 的信度水平的相关性检测；在 C 组样本中，大气 CO₂ 浓度和温度存在十分显著相关性，相关性系数分别为 0.760，通过显著性水平为 0.01 的信度水平的相关性检测，而大气 CO₂ 浓度和温度的相关性系数为 0.253，未通过显著性水平检测。综合考虑，可以判断大气 CO₂ 是影响区域降水和温度变化的主要原因，考虑到 C 采样点位置贴近策勒县达玛沟乡，易受到达玛沟东南方向的丰收水库的影响，水库的调节作用可以降低夏季平均温度，增加冬季温度^[31]，削弱了大气 CO₂ 浓度对 C 样点气温的影响，因此 C 组中大气 CO₂ 浓度和气温之间不存在相关关系。

(3) 相关性检测显示，样本中 TN 和 C/N 存在极为显著的负相关关系，其中 A 组、B 组和 C 组样本中 TN 和 C/N 的相关系数分别为 -0.897、-0.926 和 -0.912，因此 TN 的降低是 C/N 上升的决定因素。

(4) 植物叶片氮素水平可在一定程度上代表其光合性能，有研究显示，两者的相关性可以达到 75%，高温会阻碍植株光合作用，光胁迫会降低植株光和系统的活性，削弱叶片内氮素的含量^[22]。同时氮作为一种营养元素，会优先分配给植物生长和生殖最需要的器官，研究显示虽然干旱并未增加地下部分的氮素含量，但可以增加根部的氮素总量^[32]，所以当红柳受到高温所引发的干旱胁迫时，氮素会转移到根系，导致叶片中氮素的降低。如图 12，在研究选取的 3 组样本中，受大气 CO₂ 浓度增加影响，温度呈现明显的逐年增加趋势，而 TN 则存在

下降趋势。即在温度增加的同时，TN 含量开始出现下降。相关性研究显示，B 组样本中，TN 和年平均气温存在极为明显的负相关关系，而在 A 组和 C 组中虽然未能通过信度检验，但是其相关系数均小于 0。

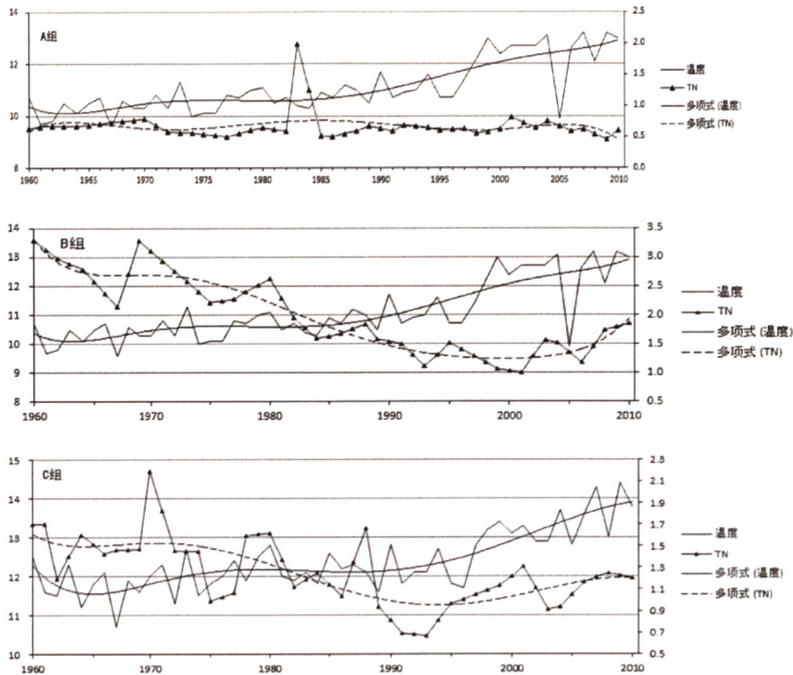


图 12 TN 和温度的变化趋势对照

(5) 沙漠地区的干沙层可以显著抑制土壤深层水分蒸发，当流动沙丘厚度达到 5cm 以上，土壤水分蒸发量将主要取决于干沙层厚度，其存在可以有效抑制沙地水循环中的蒸发作用，同时，流动沙丘具有优良的透水性能，天然降水可以迅速下渗为地下水，降雨后，高蒸发使沙丘表面再度形成干沙层，并迅速增厚，成为一层天然的保护膜^[33]。因此，干沙层对深层土壤水分蒸发的良好抑制作用和对天然降水的良好透过性，对沙漠的生态环境具有重要意义，但这同样意味着，即使降水量出现增加，干沙层的含水状况短时期内也难以得到改变。

新疆的土壤基质主要为第四纪松散沉积物，极易受暴雨影响而发生水土流失，根据中国水利部的划分，新疆地区位于我国主要的风沙区之内，塔克拉玛干沙漠边缘的绿洲属于我国重点预防保护区，存在水土流失的潜在危险。自然肥力来源于自然界的风化、熟化和生物降解过程形成的产物，当降雨强度超过土壤的下渗

能力时，便会形成径流，径流在汇集过程中将水、肥、土一起带走，形成水土流失^[32]，所以随着水土流失的加剧，土壤养分会产生从高到低的变化趋势，尤其是土壤有机质与全氮，会呈现出明显的下降趋势。因此如图 13，随着研究区域降水的增加，土壤中的氮素发生流失，氮水平下降，TN 的总体变化趋势出现了下降。根据相关性研究，B 组样本中，TN 和降水存在极为明显的负相关关系，而在 A 组和 C 组中虽然未能通过信度检验，但是其相关系数均小于 0。

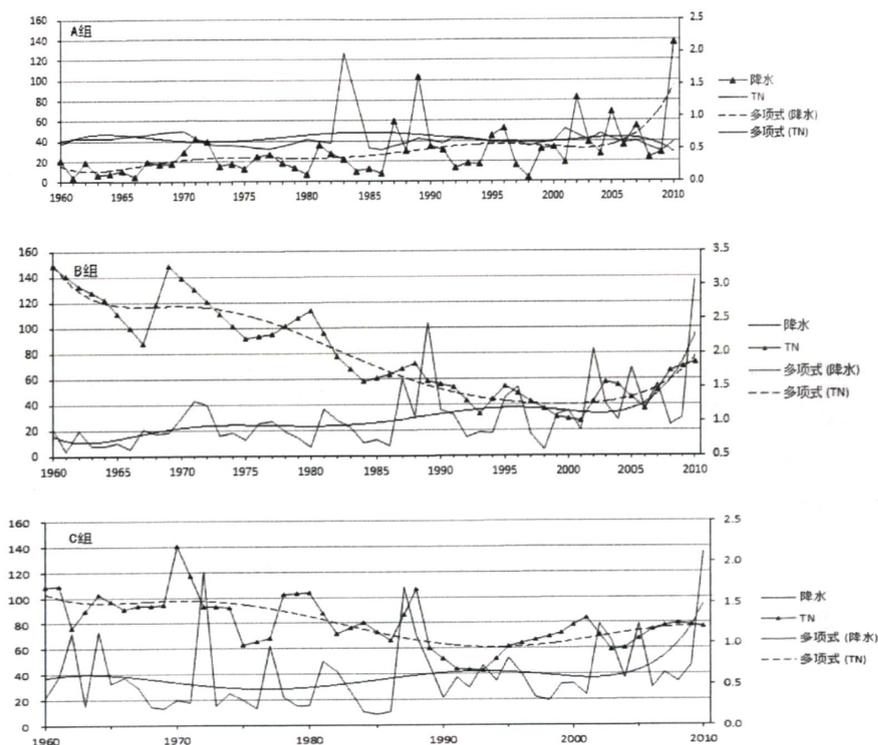


图 13 TN 和降水的变化趋势对照

6 红柳沙包记录的环境信息分析

6.1 样本中记录的气候变化信息

根据上述分析,我们认为红柳落叶中 TOC、TN 和 C/N 的含量和气候要素变化之间存在如下关系:导致研究区域温度和降水的主要因素是大气中 CO₂ 浓度升高。温度升高,有助于光合作用的进行,落叶中 TOC 含量增加;湿润的气候有助于红柳的生长,落叶中 TN 含量出现增加,而干旱胁迫会使氮素由叶片向红柳根部转移,落叶中 TN 含量出现下降;C/N 的变化主要受落叶中 TN 含量改变的影响,当 TN 含量下降,C/N 降低。根据三个样本中 TOC、TN 和 C/N 的变化趋势的分析,我们可以对研究区域气候的变化阶段进行划分。

6.1.1 各样本 TOC、TN 和 C/N 变化阶段的划分

根据三组样本的 TOC、TN 和 C/N 的 5a 滑动平均曲线,对 TOC、TN 和 C/N 的变化趋势进行分析,并对区域气候的变化趋势进行分析。

(1) A 组样本气候变化阶段划分(1792~2010),如图 14。

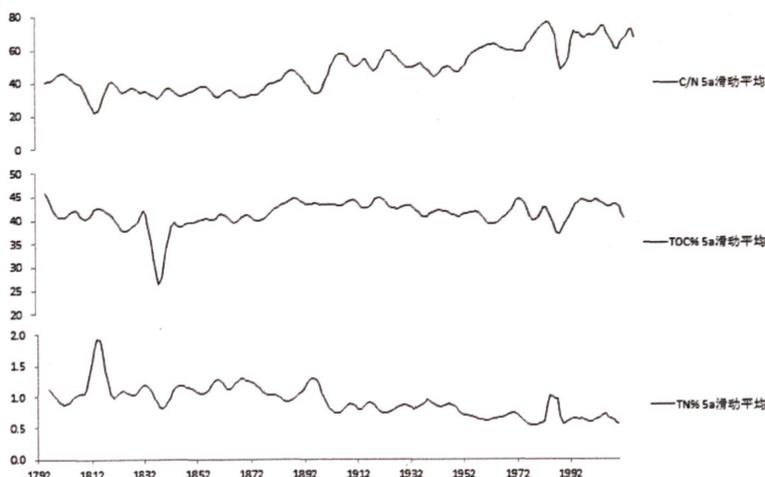


图 14 A 组样本 5a 滑动变化趋势

第一阶段(1792~1873): TOC 的阶段平均值为 39.776%, 低于总平均值 41.306%; TN 的阶段平均值为 1.147%, 高于总平均值 0.930%; C/N 的阶段平均值为 36.65, 低于总平均值 48.250。

第二阶段(1874~1958): TOC 的阶段平均值为 42.563%, 高于总平均值

41.306%；TN 的阶段平均值为 0.883%，低于总平均值 0.93%，且低于前一阶段；C/N 的阶段平均值为 45.022，低于总平均值 48.250。

第三阶段（1959~2010）：TOC 的阶段平均值为 41.664%，高于总平均值 41.306%；TN 继续降低，阶段平均值为 0.666%，低于总平均值 0.930%；C/N 的阶段平均值为 65.807，超过总平均值 48.250。

(2) B 组样本气候变化阶段划分（1826~2010），如图 15。

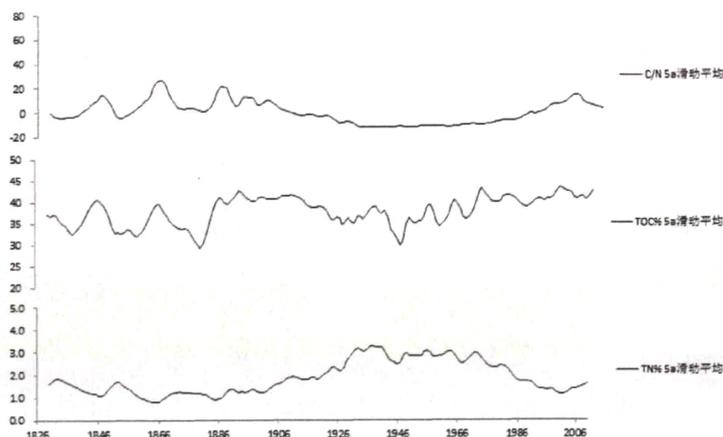


图 15 B 组样本 5a 滑动变化趋势

第一阶段（1826~1886）：TOC 的阶段平均值为 36.684%，低于总平均值 37.985%；TN 的阶段平均值为 1.255%，低于总平均值 1.844%；C/N 的阶段平均值为 30.690，高于总平均值 24.183。

第二阶段（1887~1950）：TOC 的阶段平均值为 38.191%，低于总平均值 37.985%；TN 的阶段平均值为 2.141%，高于总平均值 1.844%，且超过前一阶段；C/N 的阶段平均值为 20.573，低于总平均值 24.183。

第三阶段（1951~2010）：TOC 的阶段平均值为 40.104%，高于总平均值 37.985%；TN 的阶段平均值为 2.166%，高于总平均值 1.844%；C/N 的阶段平均值为 21.419，超过总平均值 24.183。

(3) C 组样本气候变化阶段划分（1790~2010），如图 16。

第一阶段（1790~1888）：TOC 的阶段平均值为 35.755%，低于总平均值 37.033%；TN 的阶段平均值为 1.520%，超过总平均值 1.477%；C/N 的阶段平均

值为 24.10，低于总平均值 26.163。

第二阶段（1889~1955）：TOC 的阶段平均值为 38.696%，高于总平均值 37.033%；TN 的阶段平均值为 1.584%，高于总平均值 1.477%；C/N 的阶段平均值为 25.046，低于总平均值 26.163。

第三阶段（1956~2010）：TOC 的阶段平均值为 37.309%，高于总平均值 37.033%；TN 的阶段平均值为 1.269%，低于总平均值 1.477%；C/N 的阶段平均值为 31.238，高于总平均值 26.163。

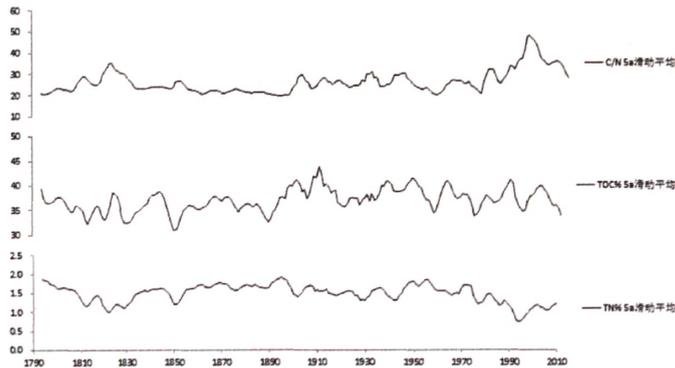


图 16 C 组样本 5a 滑动变化趋势

6.1.2 各样本气候变化阶段分析

在三组样本中(如表 3), TOC 总平均值最高的为 A 组样品, 最低的为 C 组; TN 总平均值最高的为 B 组样品, 最低的为 A 组样品; C/N 总平均值最高的为 C 组样品, 最低的为 B 组样品。三组样品中, B 组和 C 组样品的总平均值较为接近。

第一阶段, A 组和 C 组的 TOC 和 C/N 的阶段平均值均小于总平均值, TN 的阶段平均值大于总平均值, C/N 的阶段平均值小于总平均值, 说明这一时期两组样本所处区域的气候寒冷湿润, 红柳生长状况较好; B 组的 TOC 和 TN 的阶段平均值均小于总平均值, C/N 的阶段平均值大于总平均值, 说明这一时期 B 组样本所处区域的气候寒冷干燥。

第二阶段, 在这一时期中 A、B、C 三组样品中的 TOC 含量均开始增加, 阶段平均值开始高于总平均值, 说明受大气 CO₂ 浓度上升的影响, 整个塔里木盆

表 3 样品各个阶段气候划分

分组	采样地点	阶段划分	气候特征	时期(年)	有机质	阶段平均值	总平均值
A	安迪尔古城		冷湿	1792~1873		39.776	41.306
B	安迪尔牧场		冷干	1826~1886	TOC	36.684	37.985
C	达玛沟		冷湿	1790~1888		35.755	37.033
A	安迪尔古城	第一阶段	冷湿	1792~1873		1.147	0.930
B	安迪尔牧场		冷干	1826~1886	TN	1.225	1.844
C	达玛沟		冷湿	1790~1888		1.520	1.477
A	安迪尔古城		冷湿	1792~1873		36.650	48.250
B	安迪尔牧场		冷干	1826~1886	C/N	30.690	24.183
C	达玛沟		冷湿	1790~1888		24.10	26.163
A	安迪尔古城		暖干	1874~1958		42.563	41.306
B	安迪尔牧场		暖湿	1887~1950	TOC	38.191	37.985
C	达玛沟		暖湿	1889~1955		38.696	37.033
A	安迪尔古城	第二阶段	暖干	1874~1958		0.883	0.930
B	安迪尔牧场		暖湿	1887~1950	TN	2.141	1.844
C	达玛沟		暖湿	1889~1955		1.584	1.477
A	安迪尔古城		暖干	1874~1958		45.022	48.250
B	安迪尔牧场		暖湿	1887~1950	C/N	20.573	24.183
C	达玛沟		暖湿	1889~1955		26.046	26.163
A	安迪尔古城		暖干	1959~2010		41.664	41.306
B	安迪尔牧场		暖湿	1951~2010	TOC	40.104	37.985
C	达玛沟		暖湿	1956~2010		37.309	37.033
A	安迪尔古城	第三阶段	暖干	1972~1873		0.666	0.930
B	安迪尔牧场		暖湿	1826~1886	TN	2.166	1.844
C	达玛沟		暖干	1790~1888		1.269	1.477
A	安迪尔古城		暖干	1972~1873		65.807	48.250
B	安迪尔牧场		暖湿	1826~1886	C/N	21.419	24.183
C	达玛沟		暖干	1790~1888		31.238	26.163

地南部地区气温开始增加，气候转暖；B组和C组的TN值上升，超过总平均值和第一阶段的平均值，C/N开始下降，低于第一阶段，气候开始转向湿润；A组样品中TN含量开始下降，阶段平均值低于总平均值，区域气候进入暖干时期。

第三阶段，A组TOC和C/N继续增加，和B组、C组之间的差距拉大，高温干燥气候继续加深；B组和C组的TOC含量继续增加，气温继续升高，C组TN和C/N的阶段平均值均小于总平均值，气候向暖干方向发展，B组TN的阶段平均值继续上升，超过总平均值和前两个阶段，C/N的阶段平均值继续下降，气候继续向暖湿方向发展。

综上所述，虽然受到区域环境和人类活动的影响，使区域之间的气候变化存在差异，但是整个塔克拉玛干沙漠南缘地区气温在大气CO₂浓度升高的影响下持续升高，在经历一段湿润时期后，整个地区的气候向高温干旱方向发展。

6.1.3 用红柳有机质研究气候变化的可靠性分析

为了对本文中划分的气候变化阶段做进一步的验证，我们对目前关于中国过去气候变化研究所取得的成果进行了总结，并与三组样本中TOC、TN和C/N的变化趋势进行对比分析。

关于中国西北地区的气候演化过程，已经有许多学者利用不同的气候环境信息载体进行了大量的研究，并取得了令人瞩目的研究成果。竺可桢先生曾经依据考古遗迹、历史文献记录等资料对我国近五千年来的气候变化进行重建，指出17~19世纪发生的小冰期时段是近2000年来中国最主要的寒冷时期，其中冷期主要发生在1470年~1520年、1620年~1720年、1840年~1890年；施雅风、姚檀栋等人根据古里雅冰芯提供的高分辨率的记录资料进行了进一步的详细研究，指出从1510年开始，中国进入冷暖波动强烈的“小冰期”时期，至1920年气温上升“小冰期”结束，在这一过程中，1800年~1910年为最后一个冷期，这一时期中的冷谷出现于1830年，并在1820年间受1815年印度尼西亚坦博拉火山爆发影响发生一个冷事件，而1920年后将进入持续的升温期，姚檀栋进一步提出1791年~1880年为冷期阶段，1881年~1990年气候转暖进入暖期，并且从1501年开始，至1800年结束，气候处于湿润时期，随后在1801年~1900年间气候进入干旱时期，1901年至今则进入湿润时期；郑景云、邵雪梅等人采用祁连圆柏

树为载体对青藏高原东北部地区过去 1000 年的温度变化进行分析，发现在 1580 年~1890 年气候寒冷，20 世纪后气候出现迅速上升；葛全胜对现有的高分辨率气候重建序列进行总结后认为，中国各区域进入暖期的时间存在差异，青藏高原和西北区从 1850 年开始气候转暖，而东北、东南和东中部地区则分别从 1890 年，1900 年和 1920 年开始进入暖期；根据新疆历史上的灾情记录（如表 4），从 1879~1890 年，新疆地区冻害频发，代表着新疆地区气候出于相对较冷的阶段，而从 1892 年开始至 1903 年冻害减少，旱灾水灾逐渐增加，意味气温回升，进入转暖^[34-38]。与研究样本进行对照（图 14~15），在 1792 年~1873 年，1826 年~1880 年，1790 年~1850 年之间，A 组、B 组和 C 组三组样本分别发生了 TOC 下降的现象，三组样本分别从 1873 年、1880 年和 1888 年开始转暖，进入温暖期，并进入持续增加时期，线性分析显示三组样本中 TOC 存在明显的逐年增加的现象，因此 TOC 的变化与目前所获得研究成果基本一致，并且在 1815 年~1820 年之间均出现了 TOC 和 TN 剧烈下降的现象，与 1815 年~1820 年之间发生强烈降温事件发生对应。

对于气候的干湿变化的判断，施雅风、姚檀栋等均提出了新疆气候由干旱阶段向湿润阶段发展的观点，葛全胜认为 1430 年~1530 年和 1630 年~1740 年成为中国西部地区最干旱的两个百年，1550 年~1630 年和 1930 年~2005 年则是最为湿润的两个百年，而进入 20 世纪后，气候趋向湿润阶段；姚檀栋根据对冰芯的研究，得出 1901 年后青藏高原西北部气候开始进入了湿润时期^[34-38]。根据三组样本的分析显示，A 组和 C 组的 TN 值均出现明显的线性下降趋势，线性倾向值分别为-0.03%/10a 和-0.012%/10a，代表区域气候出现变干趋势，C 组样本曾在 1826 年~1886 年间存在短暂的湿润阶段，而 A 组样本所处的区域气候则显示出持续变干的趋势，只有 B 组的 TN 值出现明显的线性增加趋势，其线性倾向率为 0.06%/10a，意味着区域气候变化趋向湿润状态。三个样点中，A 样点位于安迪尔古城附近，安迪尔古城自公元 11 世纪后逐渐荒弃，因此 A 组样品受人类活动影响最小，可以直接反映气候的自然变化趋势；B 组在安迪尔牧场附近，人类的灌溉和土壤改良活动会对区域气候的干湿变化产生重要影响，而这可能是 B 样点中 TN 含量维持上升的重要原因；C 组紧邻达玛沟乡，位于丰收水库西北，受

到人类活动影响最大，丰收水库于 1958 年后建成，而 1960 年前后，C 组样品中 TN 开始下降，人工蓄水增加所导致的下游水量减少可能造成了下游区域气候的逐渐干燥。

表 4 新疆历史灾情记录

年份	灾情	年份	灾情	年份	灾情
1879	雹	1892	水、旱、雹、冻	1903	冻
1884	雪	1893	水、旱	1905	水、雹
1885	旱	1895	旱、水	1908	水、雹
1887	水、雹、霜、雪	1896	雹		
1888	旱、雹	1897	水		
1890	水、冻	1899	雹、水		
1891	水、雹	1900	旱、风		

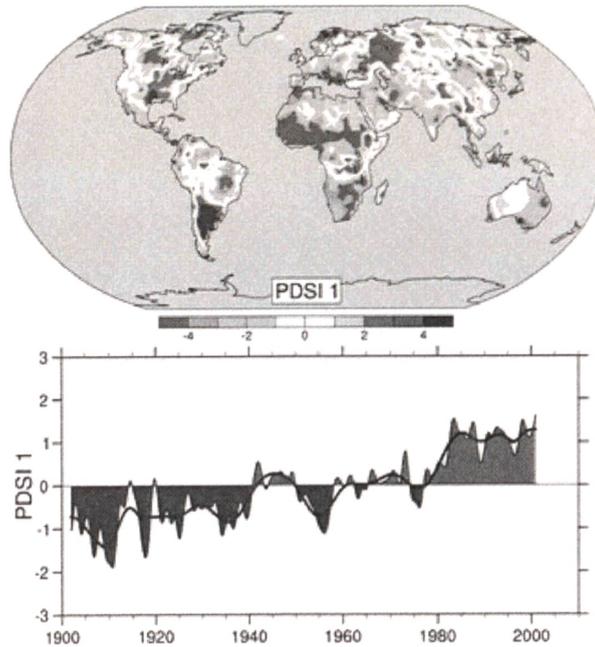


图 17 每月帕尔默干旱强度指数图

综上所述，从 1790~2010 年，塔克拉玛干沙漠南缘地区总体上存在着由冷湿~暖干的变化，而这个结论与目前学者的研究结果相符，而这种变化与目前的全

球气候干湿变化是相符合的,如图 17 为每月的 Palmer 干旱指数强度图(PDSI), Palmer 干旱严重程度指数通常用来衡量土壤水分蒸发和降水的变化,其中红色区域和橙色区域代表干旱少雨,蓝色区域和绿色区域则代表降高于平均水平,黑色曲线代表格局的变化趋势^[39],曲线显示从 1900~2000 年这一百年中,全球正发生着由湿向干变化的整体趋势。

7 结论与展望

7.1 主要研究结果

(1) 对取自塔克拉玛干沙漠南缘地区的三组红柳沙包落叶有机质中 TOC、TN 和 C/N 的含量与温度和降水关系进行了分析和讨论。结果显示,红柳落叶中 TOC、TN 和 C/N 含量的变化可以反映红柳生长区域的环境温度和干湿状况的变化: TOC 含量增加,气温开始上升; TN 值下降, C/N 含量增加,区域气候开始进入干燥时期。根据这种关系,对 A 组、B 组和 C 组样本所处的区域近 221 年来的气候变化进行了阶段的划分:

A 组: 1792 年~1873 年(冷湿阶段), 1874 年~1958 年(暖干阶段), 1959 年~2010 年(暖干阶段);

B 组: 1826 年~1886 年(冷干阶段), 1887 年~1950 年(暖湿阶段), 1951 年~2010 年(暖湿阶段);

C 组: 1790 年~1888 年(冷湿阶段), 1889 年~1955 年(暖湿阶段) 1956 年~2010 年(暖干阶段)。

综合三处样本气候阶段的划分,并结合目前学术界的研究成果,我们认为虽然由于受到人类活动和区域环境差异的影响,小区域气候变化表现出各自的特点,但是其气候的变化趋势在整体上存在着一致性,塔克拉玛干沙漠南缘地区气候正经历着冷湿向暖干变化的过程,而这种变化与目前全球气候的整体变化趋势相同。

(2) 通过对红柳落叶有机质中 TOC、TN 与 C/N 三者含量之间的相关性进行分析,发现红柳落叶中 TN 和 C/N 之间存在即为显著的负相关关系, TN 是决定 C/N 变化的主要因素。

(3) 通过对红柳落叶有机质中 TOC、TN 与 C/N 三者含量之间进行线性分析,发现三组样本中 TOC 的含量存在明显的上升趋势,倾向值分别为 0.101%/10a、0.284%/10a 和 0.111%/10a; A 组和 B 组的 TN 含量存在明显下降的趋势,倾向值分别为-0.03%/10a 和-0.012%/10a; B 组样本中 TN 出现明显增加趋势,倾向值为 0.06%/10a; A 组和 B 组样本的 C/N 明显升高,倾向值分别为 1.784/10a 和 0.378/10a, B 组样本 C/N 出现明显下降趋势,倾向值为-0.61/10a。

(4) 通过对大气 CO₂ 和降水、温度等环境因子之间的相关性分析, 发现降水和温度与大气 CO₂ 之间存在着极为显著的正相关性关系, CO₂ 浓度增加是研究区域降水量和气温增加的主要诱因。

(5) 通过对降水量和 TN 之间的相关性分析, 发现降水量的迅速增加会使当年红柳落叶中 TN 减少。

7.2 存在的主要问题

(1) 土壤中氮素的丰富与否直接影响到红柳叶片中氮素的含量。本文中缺乏研究区土壤中有效氮方面的数据及土壤复氮的速度, 对红柳植株的具体生理过程缺乏详细的资料, 因此难以对水土流失对 TN 含量的影响进行进一步的研究。

(2) 随着人类社会的发展, 人工绿洲的面积在逐年扩大, 为了维持人工绿洲的水分循环, 大量的水利工程建设是在所难免的, 而随着蓄水面积的增加, 区域气候会受到的哪些影响, 需要进一步研究。

(3) 目前, 我们对于利用 TOC、TN、C/N 比值进行气候阶段划分的定性研究已经做了很多工作, 并取得令人满意的成果, 但是由于本人能力有限, 对于定量方面的研究和利用 TOC、TN 和 C/N 进行气候重建的工作, 尚存在欠缺, 希望能在以后的学习中进一步加深了解。

7.3 未来展望

(1) 继续深入探讨红柳沙包对环境的指示作用

目前, 我们已经对红柳沙包年层作为环境信息载体的可行性进行了大量论证, 并将进一步尝试将研究从定性研究向定量研究推进, 建立一种历史气候重建的新手段, 建立高分辨率环境变化研究新手段, 建立现代荒漠地区红柳沙包沉积纹层计年的方法, 为荒漠地区环境变化研究提供新的理论依据和技术参考。

(2) 对于人地关系的指导意义

作为一种生长在干旱区的主要植被, 红柳沙包的演化对沙漠迁移和土壤风蚀具有重要意义, 是反映土壤风蚀和土地荒漠化的良好标志。随着人类活动在塔里木地区的逐渐增加, 人类生产生活活动对环境改造的作用将进一步加大。而红柳沙包的地貌学特征、土壤学特征、生态学特征对其生境的改变具有明显的指示性作用, 对研究荒漠地区的人地关系演化具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 曲建升, 葛全胜, 张雪芹. 全球变化及其相关科学概念的发展与比较[J]. 地球科学进展, 2008, 23 (12): 1278-1284.
- [2] 丁旋. 十五万年以来的古气候及其研究方法综述[J]. 地质科技情报, 1998, 17 (2) : 39-44.
- [3] 姚檀栋, 王宁练. 冰芯研究的过去、现在和未来[J]. 科学通报, 1997, 42 (3): 225-230.
- [4] 刘启明, 王世杰, 欧阳自远. 洞穴化学沉积物的古气候记录与古生态环境意义[J]. 地理科学进展, 2001, 20 (4): 384-390.
- [5] 卢粤晗, 孙永革, 翁焕新. 湖泊沉积有机质的地球化学记录与古气候古环境重建[J]. 地球化学, 2004, 33 (1): 20-28.
- [6] 谢连文, 黄思静, 李锋. 罗布泊盐湖近 2000a 气候变化的高分辨率遥感研究[J]. 成都理工大学学报, 2004, 31 (3): 302-306.
- [7] 肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁[J]. 微体古生物学报, 2006, 23 (1): 77-86.
- [8] 慈龙骏, 杨晓晖. 荒漠化与气候变化间反馈机制研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24 (4): 755-760.
- [9] 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, 2005, 28 (5): 565-568.
- [10] 阿依努尔·买买提, 邱玉宝. 近 20 年和田绿洲水资源变化及其驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2013, 27 (4): 118-122.
- [11] 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.
- [12] 王立群, 戴雪荣, 华珞, 等. 安徽龙河口水库沉积物碳、氮、磷地球化学记录及其环境意义[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (4): 59-64.
- [13] 刘春莲, 杨建林, 白燕, 等. 珠江三角洲全新统横栏组淤泥沉积中的有机碳、总氮和碳氮比值记录[J]. 中山大学学报, 2003, 42 (1): 127-128.

- [14] 李倩. 大兴安岭中段月亮湖记录的 21kaB.P.以来高分辨率古气候变化: 来自 TOC、TN 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的证据[D]. 北京, 中国地质大学, 2011.
- [15] 张成军, 陈发虎, 尚华明, 等. 中国西北干旱区湖泊沉积物中有机质碳同位素组成的环境意义—以民勤盆地三角城古湖泊为例[J]. 第四纪研究, 2004, 24 (1): 88-94.
- [16] 高学鲁, 陈绍勇, 马福俊, 等. 南沙群岛西部海域两柱状沉积物中碳和氮的分布和来源特征及埋藏通量估算[J]. 热带海洋学报, 2008, 27 (3): 38-44.
- [17] 康建宏, 周续莲, 许强. 大气 CO_2 浓度升高对植物的影响[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23 (4): 53-58.
- [18] 许振柱, 周广胜, 肖春旺, 等. CO_2 浓度倍增和土壤干旱对两种幼龄沙生灌木碳分配的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29 (2): 281-288.
- [19] 曾长立, 王晓明, 张福锁, 等. 浅析 C_3 植物和 C_4 植物对大气中 CO_2 浓度升高条件下的反应[J]. 江汉大学学报, 2001, 18 (3): 6-14.
- [20] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. 大气 CO_2 浓度和温度升高对作物生理生态的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (9): 1169-1173.
- [21] 杨江龙. 大气 CO_2 与植物氮素营养的关系[J]. 土壤与环境, 2002, 11 (2): 163-166.
- [22] 许振柱, 周广胜. 全球变化下植物的碳氮关系及其环境调节研究进展—从分子到生态系统[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (4): 738-747.
- [23] 李伏生, 康绍忠. CO_2 浓度、氮素和水分对春小麦碳素固定的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35 (5): 546-549.
- [24] 肖小勇. 塔里木盆地生态环境变迁研究[J]. 新疆师范大学学报, 1998, 19 (4): 47-53.
- [25] 刘嘉麒, 秦小光. 塔里木盆地的环境格局与绿洲演化[J]. 第四纪研究, 2005, 25 (5): 534-539.
- [26] 代述勇, 雷加强, 赵景峰, 等. 策勒河出山径流特征及其趋势[J]. 干旱区地理, 2009, 32 (2): 204-210.
- [27] 杜虎林, 熊建国, 高前兆, 等. 塔里木沙漠南缘安迪尔水文特征分析[J]. 中

- 国沙漠, 2007, 27 (5): 897-902.
- [28] 迪丽拜尔·艾拜都拉, 海米提·依米提, 王志明. 塔里木盆地绿洲分布与水源的关系[J]. 新疆大学学报, 2006, 23 (2): 216-218.
- [29] 王霞, 侯平, 尹林克, 等. 水分胁迫对柽柳植物可溶性物质的影响[J]. 干旱区研究, 1999, 16 (2): 6-10.
- [30] 周林飞, 许士国, 刘大庆. 扎龙湿地水循环要素变化特征与水资源管理[J]. 水力发电学报, 2008, 27 (6): 56-61.
- [31] 隋欣, 杨志峰. 青藏高原东部龙羊峡水库气候效应的变化趋势分析[J]. 山地学报, 2008, 23 (3): 280-287.
- [32] 王阿兰, 王春华, 冀慧娇. 土壤肥力与流失[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36 (4): 91.
- [33] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 等. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 29 (4): 523-526.
- [34] 郑景云, 邵雪梅, 郝志新, 等. 过去 2000 年中国气候变化研究[J]. 地理研究, 2008, 29 (4): 523-526.
- [35] 杨梅学, 姚檀栋. 近 2000 a 来古里雅冰芯记录及 19~20 世纪的气候变暖[J]. 冰川冻土, 2004, 26 (3): 289-293.
- [36] 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2000a 古里雅冰芯 10a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较[J]. 中国科学, 1999, 26 (1): 79-86.
- [37] 张高臣. 光绪朝 (1875-1908) 灾荒研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [38] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 中国科学[J]. 中国科学, 2012, 42 (6): 934-942.
- [39] The IPCC Explains. Changes in Precipitation EB/OL] [2013-03-10]. <http://co2now.org/>.

致谢

不知不觉中研究生生涯已经快要走到最后，三年中经历了不少的风风雨雨，在这期间，有过成功的喜悦，有失败的焦躁，有着期望的落空的空虚，但回头时，身处的这片天空依旧湛蓝。值此毕业之际，特别想那些支持过我、帮助过我的人献上最衷心的感谢和深深的祝福！

本论文是在导师的悉心指导下完成的，从资料的收集、论文的选题、提纲的确定到论文的最终定稿无不倾注着恩师的大量心血和汗水。三年里他为我提供了许多外出调研和社会实践的机会，使我能够学以致用。恩师为人朴实、学识渊博、对事业执着追求、无私奉献以及兢兢业业的工作作风和乐观积极的人生哲学都使我受益匪浅，是我在今后人生中学习的典范，也是我受益不尽的宝贵财富。学生在此谨向恩师致以最诚挚的感谢和由衷的敬意！

感谢师母对我生活上的关心和帮助。感谢同实验室的亲戚朋友们；感谢同舍好友，是他们使我在这个友好的大家庭里面度过了三年充实而又快乐的求学生活，使他们在我感到无助的时候热情的伸出双手，让我感受到同窗的温暖。

感谢答辩委员会的各位专家和老师百忙之中抽出时间评阅我的论文。

特别感谢我的父母和其他亲人多年来给予我的爱和支持，使我一直有前进的动力，我的成长和所有成绩都有他们的一份付出。祝他们幸福、安康！

最后，再次感谢所有曾给予我支持和帮助的人，愿你们生活美满、事业有成、身体健康、幸福快乐！

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
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年7月	核心期刊	3
Technical Method to Study Climatic Environmental Change in Desert Region by Tamarix Cone	Advance Materials Research	2012年11月	会议	2