

新疆师范大学

硕士学位论文

新疆艾比湖周边怪柳沙堆特征初步研究

姓名：李万娟

申请学位级别：硕士

专业：自然地理学

指导教师：李志忠

2009-06-10

摘要

最近几十年来,新疆艾比湖湖泊水域面积剧减,生态环境急剧恶化,已成为新疆最大的沙尘暴策源地之一。怪柳沙堆是干旱荒漠区分布最广的灌丛沙堆类型之一。其在艾比湖周边主要分布在河流入湖口处以及南北山麓洪冲积扇扇缘。

以新疆艾比湖周边怪柳沙堆为主要研究对象,运用风沙地貌学方法,在野外考察和观测的基础上,结合沙堆沉积物的粒度实验、土壤实验测试分析手段,研究艾比湖周边怪柳沙堆的个体特征及环境指示意义,拟初步阐明怪柳沙堆的形态以及形态参数之间的数量关系,探讨怪柳沙堆的“沃岛”及“盐岛”效应;阐明怪柳沙堆粒度变化特征;对沙堆所指示的环境意义进行探讨,所得初步结论如下:

(1) 研究区怪柳沙堆形态特征参数有良好的相关性,沙堆长轴与短轴、迎风坡长与长轴和短轴之间为高度相关;株高在影响沙堆高度及沙堆体积中占主要地位。

(2) 艾比湖周边怪柳沙堆表层沉积物主要以极细砂与细砂为主,怪柳沙堆总体的平均粒径为 4.19Φ ,怪柳沙堆砂分选极好,偏度属于极负偏,峰度属于窄峰态。怪柳沙堆砂的平均粒径与分选性、平均粒径与峰度都呈现高度负相关,表明粒径越大,分选越好,峰态愈趋向平缓。分选与峰度呈现高度正相关,表明分选越好,峰态越趋近平缓。分选与偏度呈现不显著正相关,表明分选越好,沙粒越趋向细粒级。平均粒径与偏度、偏度与峰度无相关性。

(3) 区域风动力条件是影响灌丛沙堆粒度特征及其空间变异的主要因素之一。在西北-东南风力的长期作用下,分布在上风区阿拉山口怪柳沙堆砂平均粒径较粗,在艾比湖东侧下风区怪柳沙堆砂的平均粒径较细。同时,艾比湖周边所有怪柳沙堆西北迎风坡平均粒径较粗,而东南背风坡砂物质的平均粒径较细。

(4) 研究区怪柳沙堆表层土壤的 pH 值相对稳定,土壤主要呈现轻度盐渍化,以硫酸盐类为主。怪柳沙堆呈现明显的“盐岛”效应与“沃岛”效应。

(5) 研究区怪柳沙堆主要分布在河流入口处及南北山麓洪积扇扇缘,是在盐化作用、脱盐作用与风沙作用交集下形成的,河流入口处怪柳沙堆处于稳定阶段,玛依力山洪冲积扇扇缘残余怪柳沙堆处于衰退阶段。由于艾比湖湖面不断地退缩,风力强大,沙源充足,因此灌丛沙堆的存在短期内有效减缓了荒漠化的进程。但稳定只是暂时的,如果研究区灌丛沙堆植物遭到人为破坏,或因环境变迁植物衰退,沙堆就会遭受风蚀进入活化阶段,区域生态环境可能进一步

恶化。

关键词：艾比湖；怪柳沙堆；形态；土壤；粒度；

ABSTRACT

Aibi Lake in Xinjiang province has become one of the largest sources of dust storms. Nabkhas commonly distributed in arid and semi-arid areas, are mounds composed of wind-borne sediment that trapped by shrubs. The *Tamarix* nabkha which widely distributed in Aibi Lake, is mainly distributed on bayou and alluvial fan fringe of north-south piedmont.

The Subject make *Tamarix* nabkha of Aibi Lake around as the main research object, by use geomorphology method, basis on inspecting and observing in the open country, testing the analytical means combining with the deposit size experiment, soil experiment and so on. Study on individual characteristics of *Tamarix* nabkha and important indicative significance of environment. Preliminarily clarify quantitative relation among morphology parameters of *Tamarix* nabkha, discuss the fertile islands effect and salinity island effect of *Tamarix* nabkha; Illustrate nabkha surface particle diameter、sorting coefficient、skewness、kurtosis and relationship among them. Reveal grain-size variation characteristics of *Tamarix* nabkha. Explore indicant environmental significance which important significance to forecast the arid area desertification developing trend. The conclusion as follows:

(1)*Tamarix* nabkha morphometric parameter has fine correlativity, there is high correlation between long axis and short axis, among long axis、short axis and upwind slope length is high correlation. The plant height plays a major role in sandpile height and sandpile volume.

(2)The soil PH of *Tamarix* nabkha in study area is relatively stable. The soil shows salinization and it is mainly of sulfate. *Tamarix* nabkha forms obviously fertile islands、salinity island and ion island.

(3)The results show that very fine sands are dominant in *Tamarix* Nabkha surface sediments, it account for 34.60%, followed by the fine sand, it account for 21.90%, then is coarse silt, it account for 13.21%. The very coarse sand content is the least, that is account for 0.08%. The average diameter is 4.19Φ . The mean sorted index is 0.10Φ which is belong to well-sorted and the slope top sort is the poorest. The coefficient of skewness is -0.39Φ which is belong very negative skewness. This mean surface sediment of *Tamarix* Nabkha is main fine components. The mean kurtosis value is 1.44Φ which is belongs to leptokurtic distribution, consequently wind action process is persistent and sort is well and it shows leptokurtic

distribution. The average diameter showed excellent negative correlation to sorting and kurtosis. It shows that the larger the average diameter, the better the sorting and the gentler the kurtosis. It presents high positive correlation between sorting and kurtosis, the better the sorting and the gentler the kurtosis. There are not significant positive correlation between sorting and skewness, it shows that the better the sorting and the sand trend to fine fraction. It had no correlation between the average diameter and skewness, between kurtosis and skewness.

(4) The regional dynamic wind is one of the main factors which influence the grain size composition and spatial variability of *Tamarix* Nabkha. .

(5) The *Tamarix* nabkha of study area which widely distributed on bayou and alluvial fan fringe of north-south piedmont of Aibi Lake. Intersection of salinization, desalination and Aeolian action form the *Tamarix* nabkha. It was in stable stage on bayou and in decline stage on alluvial fan fringe. Due to the Aibi lake area shrink back, powerful wind and sufficient sand source, which the nabkha slowdown the process of desertification in short-term. The stable is temporary, if the shrub which is destroyed by human or environmental changes lead to plant declension the nabkha will be eroded into activation stage, which lead to ecological environment deterioration further.

Keywords: Aibi Lake; *Tamarix* nabkha; Morphology; Soil; Particle size

新疆师范大学学位论文原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 日期： 年 月 日

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解新疆师范大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属新疆师范大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在_____年解密后适用本授权书。

非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

学位论文全文电子版同意提交后可在校园网上发布，供校内师生浏览。

本人签名：_____ 日期：_____

导师签名：_____ 日期：_____

新疆艾比湖周边怪柳沙堆特征初步研究

1. 绪 论

1.1 选题来源及依据

本文依托国家自然科学基金项目《艾比湖周边灌丛沙堆发育模式及其在荒漠化监测中的应用》(项目编号: 40761004)、《艾比湖周边灌丛沙堆记录的晚全新世环境演变》(项目编号: 40861008)以及教育部科学技术研究重点项目《艾比湖流域灌丛沙堆沃岛效应研究》(项目编号: 209141)选题并进行研究工作。

1.2 研究目的和意义

土地荒漠化是全球的重大环境问题,它已给我国广大荒漠化地区的生态环境、资源、社会经济发展及人民群众的生活等造成了严重的危害与威胁,新疆是中国土地荒漠化面积最大的省区,荒漠化土地分布遍布全疆。新疆艾比湖湿地处在内陆干旱区以及阿拉山口大风通道区,有极为重要的生态区位,是影响新疆北部生态系统的重要因素之一。自20世纪60年代以来,由于流域大规模土地垦伐,原来注入湖区的水源被截流用于灌溉,导致水位急速下降,致使湖盆区域大面积裸露,湖周生境的恶化,成为困扰北疆地区的严重生态问题之一。

灌丛沙堆是流动碎屑(砂、粉砂、盐晶粒和粘土)受植物丛的阻力,在植物丛附近产生沉积形成的不随风沙流迁移的凸起地形。它的退化演替过程通常是自然因素和人为活动对生态系统的压力综合作用的结果,同时它的出现又会对土地生产力、生态环境产生极大的影响,因此灌丛沙堆的研究不仅为沙漠化研究提供了基础数据和科学依据,而且也是完善风沙地貌学理论的需要。灌丛沙堆的产生和衰亡与土地荒漠化正逆过程关系密切。灌丛沙堆被吹扬继而沙堆与流沙相间分布是土地沙漠化过程的重要环节,通过灌丛沙堆的演化过程可以间接反映土地沙漠化的进程。譬如灌丛沙堆的结皮状况、沙堆长比、沙堆高度、沙丘密度、沙丘占地百分率、沙丘上裸沙率等指标直接反映沙堆的发育程度。因此灌丛沙堆在判别土地沙漠化程度、建立土地沙漠化评价指标体系以及重建荒漠区域环境演变历史等方面具有重要作用及意义。

怪柳是干旱沙漠和盐碱地的优良防风固沙植物,由风成沙依托怪柳灌丛加积发育的怪柳沙堆是干旱荒漠区分布最广的灌丛沙堆类型之一。怪柳沙堆发育于湿地环境,它的形成过程实质上很可能是一个环境退化的过程,引起这种退

化的原因除了诸如气候变化等自然因素外,人类的活动如放牧等干扰也是一个重要的驱动力。因此通过研究柽柳沙堆的风蚀、风积过程可以直观地反映绿洲土地荒漠化发展过程。在区域风力、沙源和柽柳灌丛的共同作用下,艾比湖周边发育了不同形态和演化阶段的柽柳灌丛沙堆。本文对艾比湖周边的柽柳沙堆及其他植被类型的灌丛沙堆进行初步研究,对深入探讨干旱区土地荒漠化发生机制、预测荒漠化发展趋势具有重要的理论和实践意义。

1.3 国内外文献综述

灌(草)丛沙堆也称作“coppice”、“coppice dune”、“shrub-coppice dunes”、“nebkhas”、“nebkha”、“phytogenic mound”或“vegetation dunes”,是流动碎屑(砂、粉砂、盐晶粒和粘土)受植物丛的阻力,在植物丛附近产生沉降堆积形成的不随风沙流迁移的凸起地形,是干旱半干旱地区沙漠、半湿润沙地和沙质海岸带常见的风积生物地貌类型^[1]。灌(草)丛沙堆既发育于海拔很低的湿润沙质海岸带,干旱、半干旱和半湿润荒漠地区的冲积扇前缘、冲积平原和沙漠边缘,也分布在海拔4000—5000米以上的高山河谷、高原盆地等高寒荒漠地区(朱震达,1994;1999;吴正,2003;王涛,2003;2005)。

由于灌丛沙堆的形成发育与气候变化和人类活动的关系十分密切,其出现与发展对于环境具有指示意义,对于它的研究不仅在丰富风沙地貌学研究内容方面具有重要价值,而且在土地荒漠化监测与评价研究以及重建区域环境演变历史等方面都具有重要意义。

20世纪80年代以来,随着风沙地貌和沙漠化过程研究的不断深入,对于灌丛沙堆的形态特征、沉积特征、生态学特征、形成演变及空间格局特征,国内外学者都在不断的进行深入探讨及研究。

1.3.1 灌丛沙堆国内外研究现状

(1) 灌丛沙堆形态与发育过程研究现状

灌丛沙堆一般的形态是一个灌丛植物的凸起沙包,其高度从几厘米到几米不等,直径可达几十米,其大小主要取决于固定它的植物的尺寸和密度^[2]。多数学者认为植被盖度、风力强度和沙供应量三个主要因素,控制着灌丛沙堆的形成演化过程^[3]。植被在灌丛沙堆的形成过程中起着重要的作用,一般认为,植物的外形、密度和生长特性影响着灌丛沙堆的形态和发育过程。

Khalaf等研究了科威特北部海岸带平原潮上带盐滩上发育的灌(草)丛沙堆,发现那里的灌(草)丛沙堆形态和尺度变化很大,但大部分灌(草)丛沙堆具有拉长的圆丘状形态;灌(草)丛沙堆的高度与植物灌(草)丛的高度有关,

灌(草)丛沙堆的长度同样与植物灌(草)丛的总高度有关^[4]。Tengberg等(1998)指出,灌(草)丛沙堆的地貌形态是由灌(草)丛植物的生态特征所控制。同时在突尼斯对灌丛沙堆形态进行回归分析的基础上,提出在气候和人类活动影响下区域灌丛沙堆发育阶段模式,即最初这种沙堆的高度随水平尺度的增加而呈线性增长,这种线性增长的趋势直至沙堆高度达到17米时为止。当沙堆高度超过17米时,沙堆高度在风蚀降低之前一直保持稳定不变。Hesp指出沙堆形态的发展主要取决于植物的密度、分布、高度和覆盖度,并受到区域风速和输沙率的影响;垂向生长的、多分枝的、植株密度高的植物常常形成较高的几何形态近似圆锥形的沙堆,而匍匐生长、少分枝、植株密度低的植物则形成相对低矮的几何形态近似半球形的沙堆;草丛背风侧沙丘形态决定于草丛的宽度和沙子的休止角,灌丛沙堆是在草丛背风侧有逆向气流的区域堆积形成的,要有效截流风所携带的细粒物质,植物的高度最少要在10~15cm以上^[5,6]。朱震达(1994)指出当灌丛沙丘的高度达到3m时,在它的下风向能够形成低矮的灌丛,当灌丛沙丘达到10m高、1km长时,在它的周围能够生长一些小树。但是,当植被覆盖率足够大时风蚀就会停止,灌丛沙堆的形成过程也就终止。并把灌丛沙堆形态形成、演变过程分为沙条、沙嘴、沙堆和沙包4个阶段。在窄单峰风环境中发育的多数灌(草)丛沙堆,迎风坡因受到风蚀而稍显陡峭,植被生长较差,背风坡坡度较缓,植被生长较好,在沙源较丰富的地区常发育风影沙丘(Tengberg等,1998)。在双峰风环境或多风向地区,灌丛沙堆大多数成圆锥形或半球形,如果地处沙源较匮乏的地区,则背风坡常缺乏风影沙丘。董治宝等(1996)指出,植物是一种特殊类型的固沙或集沙障碍物,因为植物结构本身的通透性以及植物生长和沙丘发育之间的相互作用,可能导致植物背风侧风速递减、风沙加积,植物在加积的风沙上持续生长,因此逐步发育成灌(草)丛沙堆。随着灌(草)丛沙堆的增高,灌(草)丛沙堆对周围风速的影响进一步导致背风坡的沉积作用(A Danin, 1996)。凌裕泉等(2003)在风洞模拟试验中指出植物灌丛植株密度,灌丛轮廓形态等对风流场,风沙流结构和输沙率有所影响。岳兴玲等在内蒙古高原东南部草原农垦区发现不同沙漠化阶段的灌(草)丛沙堆形态特征存在明显差异^[7]。

Hesp(1988, 1989)曾给出灌丛沙堆发育的“循环”模式,即灌丛沙堆几乎连续覆盖的植被区域开始发育,结束于因风力侵蚀而形成一系列独立分布的沙堆。Warren(1988)以阿曼流动沙丘不断前移并有 *Calligonum dumosum* 灌丛沙堆分布的沙区为例,也提出了区域灌丛沙堆发育的“循环”模式:当沙丘分布区顺盛行风向前移,大型的 *Calligonum* 沙堆逐渐被小型的 *Heleotropium* 沙堆所取代。Cooke 等(1993)在研究分布于巴基斯坦南部地区的灌丛沙堆时指出灌丛沙堆形成发育的各种复杂成因机制,譬如雨滴击溅颗粒飞入灌丛荫底区域并受到灌

从保护而逐渐积累发育形成灌丛沙堆,灌木之间较强的流水冲刷作用形成以灌木丛为掩护的鼓包,地面冻胀作用形成的鼓包,以及生物活动甚至地震活动引起的鼓包等都可以逐步发育成灌丛沙堆。Livingstone(1996)则认为:灌丛沙堆的发育是一个交互式的演变过程。第一,灌木或草丛(风沙运动的障碍物)捕捉风沙的过程;第二,在风沙不断加积而产生的适宜环境中,母体植物生长的过程;第三,其他植物种类进一步植根沙堆生长的过程。不同演化阶段灌丛沙堆形态参数及其变化趋势、植被盖度等存在很大的差异,雏形阶段灌丛沙堆水平尺度和高度的增长之间无明显相关性,发育阶段灌丛沙堆高度随水平尺度的增长出现二次函数增长规律^[8]。灌丛沙堆开始发育之后,可依某一速度持续增长,也可能被埋没(主要是风沙流),或被侵蚀夷平,但部分灌丛沙堆在沙漠的发展中保存数年之久,其发展的阶段性,也就是沙漠化发展的阶段性^[9]。李志忠等(2007)在新疆和田河流域对灌丛沙堆进行野外观测的基础上,在风洞模拟试验中研究了沙堆的风流场结构和表面风蚀压力分布规律,初步阐明了内陆干旱区沙漠河流沿岸及沙漠-绿洲过渡带灌丛沙堆形成的动力条件和发育模式。杜建会通过测定甘肃民勤绿洲外围不同演化阶段灌丛沙堆表面抗剪强度,选取稳定阶段灌丛沙堆,定位观测结皮和植被去除前后灌丛沙堆表面侵蚀速率,研究了白刺灌丛沙堆表面抗蚀性及其影响因素,结果表明,保留结皮和植被,灌丛沙堆不同部位均出现堆积;去除结皮保留植被,灌丛沙堆堆积量开始减小;去掉植被保留结皮,灌丛沙堆表面堆积量迅速减小;去除结皮和植被后,灌丛沙堆表面出现严重风蚀^[10]。刘冰(2007)定量分析了戈壁和沙漠生境中泡泡刺灌丛沙堆的形态特征、形态参数间的关系、空间格局以及空间异质性。

(2) 灌丛沙堆生态学研究现状

灌丛沙堆生态学研究主要集中于沃岛效应、生物量以及环境意义等方面。土壤养分聚集于乔木下的现象称为“沃岛”(fertile islands)^[11]。Tengberg在非洲萨哈尔地区的研究认为沙堆接受周边富含营养物质的风蚀物而成为一个相对的沃岛。岳兴玲等(2005)选择内蒙古高原东南部草原农垦区作为研究区,通过对该区灌丛沙堆形态及植被的野外调查、测量,沙堆表面过程的野外观测以及沙堆-丘间地沉积物理化性质的采样分析,认为灌丛沙堆是土地沙漠化的标志,并提出灌丛沙堆是一个营养物质富集的沃岛。Burkeetal 的研究表明,灌丛群落平均年龄愈大,“沃岛”发育的时间愈长,土壤养分的空间自相关愈明显;而较年轻的灌丛群落,自相关现象相对较弱,并指出对灌丛生长愈重要的土壤养分,在“沃岛”中的聚集就愈显著,空间异质性现象就愈明显,即使灌丛群落消失,这种异质性现象也将保持相当长的时间^[12]。Schlesinger 等对美国 Chihuahuan 和 Mojave 沙漠灌木的研究显示,灌丛周围土壤资源的聚集与离灌木的距离、灌木类型密切相关^[144]。刘发民指出梭梭由树冠截留的降雨形成的

树干径流将营养物质运送至根颈周围的土壤中, 在根颈周围形成“肥岛”, 增加该区域土壤的养分含量和水分含量, 对自身生存环境产生正向反馈效应, 增强了适应干旱环境的能力^[13]。灌丛对草地的入侵导致了肥岛的形成, 而肥岛本身又促进了灌丛的更新与扩张, 即肥岛与灌丛演化之间存在着反馈机制^[14]。。

El-Bana (2002, 2003) 以非洲埃及西奈半岛地中海海岸带广泛分布的 *Retama raetam* 灌丛沙堆作为研究对象, 在实测沙堆尺度、灌木尺度, 鉴定植物种类并实测植物密度的基础上, 详细测量了灌丛沙堆各个特征部位的土壤温度和湿度, 光合作用活动辐射 (PAR), 土壤特性, 以探讨 *Retama raetam* 灌木对沙堆微环境和草本植物的影响, 结果表明灌丛植物和沙堆在支配沙堆生态系统功能的过程中相互作用。

贾宝全等 (2002) 在甘肃民勤利用灌丛沙堆的长、宽、高等指标及线性回归方法对白刺沙堆的总生物量, 地上生物量, 沙堆内生物量和粘土内生物量建立了回归预测模型。许文强等在研究天山北坡绿洲-荒漠过渡带灌丛土壤属性时发现, 不同类型灌丛对土壤 pH 值和养分的影响显著。同一类型、同一深度灌丛土壤 pH 值并没有随采样位置的不同而表现出明显的规律性^[15]。崔向慧等 (2007) 采用波文比-能量平衡法对甘肃民勤荒漠-绿洲过渡区怪柳、白刺灌丛沙包和裸露流动沙丘的蒸散特征与变化规律进行分析, 探讨蒸散量与气象因子的关系, 在此基础上, 应用土壤-植被-大气连续体 (sPAC) 的耦合数值模式, 对不同植被灌丛的蒸散过程进行模拟^[16]。Link 等 (1994) 在正常降水和降水增加条件下, 比较了 *Grayia Spinosa* 密集生长的灌丛沙堆, 植被稀疏的洼地以及 *Artemi tridentata* 密集生长的洼地三种情况。研究了干旱区灌丛沙堆和丘间洼地的土壤水动力学与相关植物的关系。王升堂 (2007) 通过对民勤绿洲边缘带灌丛沙丘区的风沙实地观测, 探讨绿洲边缘带固定、半固定及半流动灌丛沙丘的防风作用, 指出气流通过单个固定灌丛沙丘时, 近地面平均风速降低 4.4%, 且风是连续降低的, 愈靠近内侧降低得愈多, 到绿洲内部农田边缘处时, 平均风速仅有对照点的 21%^[17]。

生物结皮对沙地土壤养分有显著的富积作用^[18]。而目前对于灌丛沙堆土壤养分的研究没有结合生物结皮的研究, 从而无法确定生物结皮对灌丛沙堆土壤养分富集的具体作用以及灌丛下微生物对土壤理化性质变化的影响。

(3) 灌丛沙堆沉积学研究现状

Nickling 等 (1994) 在西非马里对沙堆的纵剖面进行了初步观察, 发现迎风坡持续遭受风蚀, 导致植物露根沙堆后退, 土层较疏松, 层理不清晰; 背风坡可见多层近似水平的或缓倾斜中、细沙纹层, 单层厚度 15~20cm, 倾角小于 10度。沙层密度较大, 偶尔可见粗沙夹层。Tengberg (1995, 1998)、Langford (2000) 等在非洲萨赫勒 (Sahel) 地区、南非、阿拉伯半岛和美洲西南部等地

区的研究表明,与丘间地相比,灌丛沙堆沉积物的平均粒径较粗,中、粗砂(包括与其尺度相当由粉砂、粘土胶结成的团聚体)含量较高;磨圆度和分选性较差,但比丘间地较好;沙堆沉积物矿物组成与丘间地或附近的沙源物质基本一致,这都支持了沉积物来源于灌丛沙堆的丘间地或周边地区这一观点,并经过了风力的初步分选和打磨,灌丛沙堆形成就是沙物质原地重新分布的结果。

赵元杰,夏训诚(2007)指出罗布泊地区红柳沙包纹层沙粒度特征有环境指示意义,其所有沉积纹层沙物质均以风成沙为主。除沙层厚度外,粒级组成、粒度特征参数、粒级分布曲线以及粒度累计概率曲线等可反映部分环境要素的变化^[19]。

灌丛沙堆不同部位的粒度组成,与其周围的风况条件,物质来源有很大关系,同时沙堆顶部植物能增加沙堆表面的粗糙度,对气流阻滞消能,从而使灌丛沙堆流场结构发生变化,在灌丛沙堆的不同部位呈现出相应的粒度特征^[20]。从沙堆形态大体上可以将新疆和田河流域实测的柽柳灌丛沙堆近似划分为半球形和圆锥形两种形态,二者在粒度特征方面存在一定的差异,主要是由于形状的差别所导致的流速和压力在不同部位的差异性所造成的^[29]。

(4) 灌丛沙堆空间格局特征研究现状

20世纪90年代以来,灌丛沙堆的空间格局研究受到很多学者的关注。杜建会通过甘肃民勤不同演化阶段灌丛沙堆的调查,研究了其空间格局、形态和表层土壤水分特征及其差异。结果表明,研究区灌丛沙堆以稳定阶段为主,但这种稳定状态可能是暂时的,随着距离沙丘距离的变化,不同演化阶段灌丛沙堆呈现出有规律的分布,植被、表层土壤水分以及风力的相互作用是引起这种分布的主要原因。随着灌丛沙堆的演化,灌丛沙堆的形态参数呈现不同的变化趋势,雏形阶段灌丛沙堆的高度与水平尺度之间无明显相关性,发育阶段灌丛沙堆高度随水平尺度的增加呈现二次函数增长,稳定阶段灌丛沙堆高度随水平尺度的增加呈现对数函数增长,活化阶段灌丛沙堆高度与水平尺度的相关性较差^[8]。

梁继业采用点格局和标记点格局的方法对鄂尔多斯高原雾冰藜在沙漠一河岸过渡带白刺沙堆上的空间分布特征进行分析,表明雾冰藜聚集生长的距离范围小于沙堆的平均直径5.54 m。而且在小于这个尺度范围内雾冰藜与白刺沙堆表现为正相关,说明二者之间有相互吸引的共存关系;不同沙堆之间的雾冰藜数量彼此之间没有影响;并且在小尺度范围内表现为聚集分布。说明其种子的扩散一般是集中在植物周围,而不同沙堆间种子的扩散,风起到了重要的传递作用^[21]。

于春堂(2006)通过运用样方方差法、小波分析、分形分析、光谱分析以及孔隙度分析等方法对鄂尔多斯高原北缘唐古特白刺灌丛沙包的空间格局进行研究,提出格局的形成是多因子(竞争、种子扩散、干扰和异质性)共同作用的

结果, 格局是过程的结果, 也可以反映过程^[22]。

1.3.2 怪柳沙堆国内外研究现状

(1) 怪柳沙堆形态生态学研究现状

怪柳 (*Tamarix chinensis*) 灌丛沙堆直径可达数十米, 高度一般为 3-10 m, 在风力较弱的区域常呈现圆丘状和圆锥体形态, 或孤立分散分布或集聚成群分布, 多分布于干旱区河流冲积平原上^[23]。怪柳在新疆有 16 个种, 分布广而且面积大, 约 30 多万公顷(刘铭庭, 1995)。怪柳的分布与地下水位密切相关。成熟怪柳个体的最适地下水位一般是 3m 以上, 至 10 m 以下时, 大多数怪柳很难生存(张立运, 1994)。这也是怪柳群落多分布于河岸、滨湖、扇缘、和低洼地的原因。李志忠, 武胜利等(2006)分析了新疆和田河流域怪柳灌丛流场, 表明怪柳灌丛引发的风沙流流场结构的变化, 干扰了风沙流的运行, 对于维持怪柳灌丛沙堆的形态, 促进怪柳灌丛沙堆的增长具有重要作用。

李君(2007)对准噶尔盆地南缘怪柳灌木的冠下、冠缘和灌丛间地3种生境的土壤进行了采样、分析, 指出怪柳存在“肥岛”现象, 并且怪柳“肥岛”的水平范围可能超出了本身冠幅覆盖区。尹传华等(2008)选择盐化草甸、灌丛及沙漠3种景观类型, 测定了怪柳灌丛下和灌丛间空地土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、水分含量等指标, 并用土壤养分的富集系数来表征“肥岛”效应的强弱。结果发现盐化草甸退化为灌丛时, 怪柳“肥岛”效应增强, 怪柳冠下土壤SOC和TN的富集系数分别增加; 而随着灌丛向沙漠逐步过渡, 肥岛效应逐渐削弱直至消失, 怪柳冠下土壤SOC和TN的富集系数出现持续下降的趋势。这种变化反映了荒漠化在该地区发展所处的不同阶段, 而肥岛中SOC和TN的富集系数是反映这种变化的有效指标; 同时, 肥岛的存在也为该地区群落演化提供了必要的条件^[24]。怪柳灌丛诱导形成肥岛, 加速了荒漠土壤的熟化和肥力的提高。在西北干旱区怪柳灌丛的存在会导致土壤有机质、盐分在冠下的富集, 即“肥岛和盐岛”效应, 而且在怪柳死后, 这种富集效应依然不同程度地存在, 但怪柳在为土壤增加有机质的同时, 也产生了灌丛下土壤表层盐分的积累和土壤pH升高的问题, 并且在死怪柳包上依然保持着这一趋势, 这必然对其他植物的生长产生深刻影响, 这是干旱区怪柳灌丛生态效应的两面性^[25]。

刘冰等(2008)以甘肃金塔县和内蒙古额济纳旗的荒漠绿洲过渡带为研究区, 研究了戈壁和沙漠两种生境中怪柳灌丛沙堆的形态特征, 定量分析了不同生境中怪柳灌丛沙堆形态参数间的关系、空间格局以及空间异质性, 结论表明沙堆高度、体积和植被冠幅的均值在戈壁生境均小于沙漠生境, 植被高度和盖度的均值在戈壁生境中均大于沙漠生境, 戈壁生境中沙堆相互分隔呈斑块状格局, 沙漠生境中呈沙丘链状分布, 空间异质性由非随机的结构原因形成的变异为主,

高强度的风积产生较深的沙埋对怪柳灌丛生长的促进作用及灌丛与沙堆间的反馈效应是怪柳灌丛沙堆的适应性机理。

(2) 怪柳沙堆生物地貌发育过程研究现状

朱震达(1962)根据灌(草)丛沙堆的发育过程,将新疆塔里木河流域的怪柳灌丛沙堆分为两类,一类是在现代风力作用下,沙粒在植物周围堆积所形成;另一类是原来具有怪柳生长的黄土状沙土堆,以后为流沙覆盖所形成的沙堆。

周廷儒提出盐土平原以红柳灌草沙堆最为发达,如遇到积盐过多或水分枯竭,红柳枯萎失去固沙能力,烈风吹蚀沙包致使红柳根系暴露在外加速它的死亡,沙包日益缩小甚至全部被风刮平^[26]。

Muhtar.Q等(2002)则认为塔里木盆地南部边缘的怪柳沙堆是风季的沙物质沉积和秋季的枯枝落叶层在怪柳周围经过若干年的交替沉积发育而成。许多怪柳灌丛沙堆具有枯枝落叶和风成沙交替堆积而成的清晰层理,怪柳枝干穿插其中,由春、夏季的风沙层和秋季、冬季的枯枝落叶层组成沙堆年层,年层的厚度在沙堆中部灌木主干附近的厚度较大,而在外围沙堆年层厚度较小^[27]。Qong等(2002)的研究表明在怪柳包形成之前,有丰富的地表水和地下水资源,而且还有草本植物与怪柳伴生。同时还发现有放牧对植被影响的证据。He等(2003)的研究也表明了类似的观点。由此可知,怪柳包发育于湿地环境,它的形成过程实质上很可能是一个环境退化的过程,引起这种退化的原因除了诸如气候变化等自然因素外,人类的活动如放牧等干扰也是一个重要的驱动力^[28]。

李志忠,武胜利等(2006)分析了新疆和田河流域怪柳沙堆的生物地貌发育过程,指出研究区怪柳的生态类型属于以胡杨林与灌木林下土壤为基础的吐加依土生境类型。这个生境类型可以进一步划分为三个亚生境。这些亚生境反映了怪柳沙堆不同发育阶段的生态环境特征。由于怪柳灌丛的寿命长、木质化枝干的刚性较强、根株萌发力强耐风蚀沙埋。可对地面风沙流运行产生强烈扰动。其风速剖面有别于芦苇沙堆和骆驼刺沙堆。风流场结构有利于聚集风沙。因此风沙依托怪柳灌丛堆积发育而成的怪柳沙堆平均坡度较大、沙堆存活与发育的周期也较长^[29]。

(3) 怪柳沙堆在环境演变研究中

周兴佳(1992)根据克里雅河老三角洲怪柳沙堆底部古风成沙石英热释光(TL)测年,初步推测出沙堆的发育年代和堆积速率,并结合其他证据恢复克里雅河老三角洲的环境变迁历史。文启忠等(1994)研究了新疆莫索湾、巴楚、策勒等地若干怪柳灌丛沙堆沉积剖面中的怪柳叶层、炭化层、风成沙的沉积学特征,探讨了新疆全新世晚期地貌环境演变历史。

夏训诚等(2004, 2005)指出新疆罗布泊地区的红柳(即怪柳)沙包主要

是由红柳枝叶和风成沙互层堆积而成,其中有些沙包具有清晰的“年层”构造,与树木年轮一样,具有计年和储存环境信息的功能,红柳沙包年层中红柳落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、C/N 值、沙层厚度、粒度组成等特征,记录了气候环境变化的信息,可以用来探讨和恢复过去气候和环境变化;并且罗布泊红柳沙包所有沉积纹层沙物质均以风成沙为主。除沙层厚度外,粒度组成、粒度特征参数、粒度分布曲线以及粒度累计概率曲线等可反映部分环境要素的变化。但由于红柳生长发育规律和研究区环境的复杂性,大气 CO_2 浓度、气温和降水等因素对红柳落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值和C/N 值的影响,所以利用红柳沙包年层在研究环境演变,在理论和实践上都有待进一步完善和提高^[1,30,31]。

(4) 柽柳沙堆在土地沙漠化研究中的应用

朱震达(1981)指出,灌(草)丛沙堆被吹扬继而沙堆与流沙相间分布是土地沙漠化过程的重要环节,因此,灌(草)丛沙堆地表形态的变化过程可以作为沙漠化过程的景观标志和沙漠化发展程度的一个矢量指征,灌(草)丛沙堆在判别土地沙漠化程度、建立土地沙漠化评价指标体系方面具有重要作用^[32]。穆桂金(1994)认为柽柳沙包的大小不一,一方面反映了风沙作用的差异,另一方面则反映了不同历史时期荒漠扩展的进程。

宋郁东(2000)在研究塔里木河流域沙漠化等级与主要环境因子之间的关系中指出,在潜在沙漠化情况下,植被类型以柽柳灌丛和荒漠化柽柳灌丛为主,微地貌类型则以灌(草)丛沙堆为主,随着灌丛沙堆的活化解体,伴随而来的则是沙漠化程度不断加重。并定量研究了柽柳灌丛的植物生态学特性及其与地下水位的关系模型,进而探讨了区域柽柳灌丛沙堆(柽柳包)分布频率与土地沙漠化的关系,认为柽柳灌丛沙堆主要分布在潜在沙漠化和极度沙漠化地区。

穆桂金、贾宝全等通过对塔克拉玛干沙漠各种灌草丘的成因与环境进行分析后指出,不同类型的灌草丘在发展演变过程中有密切的联系,反映了区域沙漠化发展趋势等,并提出了一套以地面工作为基础的绿洲沙质荒漠化评价指标体系,认为绿洲外围沙质荒漠化的发生发展与该地带灌丛沙堆的演化过程息息相关,通过灌丛沙堆的演化过程可以间接反映沙漠化的进程^[33,34]。

1.4 研究内容

艾比湖周边分布着大量的各种植被类型的灌丛沙堆,本文以其周边的柽柳沙堆为例,主要进行以下内容的探讨:本文主要针对艾比湖周边的柽柳沙堆,在野外观测、采样、实验和数据分析的基础上,定量研究艾比湖周边柽柳沙堆的形态特征、粒度特征及土壤养分特征,并对其发育演变过程进行定性分析。

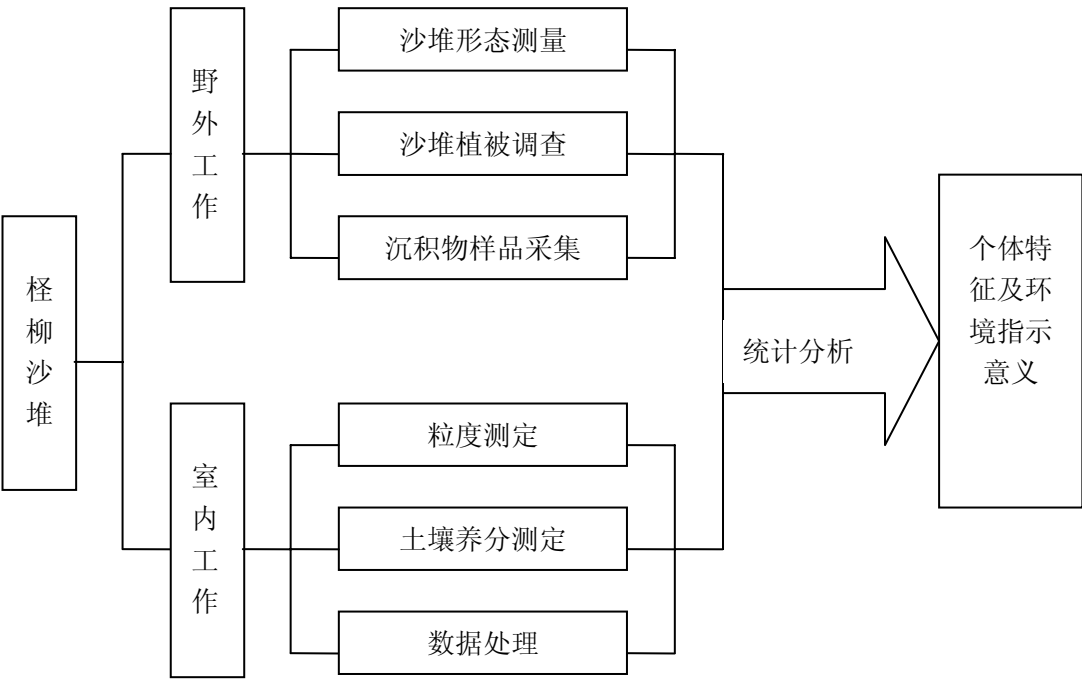


图 1 论文研究技术路线

1. 在对艾比湖周边怪柳沙堆形态野外调查测量的基础上，统计分析怪柳沙堆形态的矢量参数，揭示怪柳沙堆的形态以及形态参数之间的数量关系。
2. 灌丛沙堆沉积物粒度特征及其变化，沙丘表面沉积物是风力作用对砂粒级沉积物分选的产物。在对艾比湖周边怪柳沙堆野外调查采样的基础上，初步探讨艾比湖周边怪柳沙堆粒度分布，探讨灌丛沙堆表面粒径、分选系数、峰度、偏度以及其之间的关系，揭示粒度变化特征。
3. 在荒漠化发生过程中土壤与植被之间是相互作用的，在研究区内对怪柳沙堆不同部位的土壤进行采样，并对样品进行土壤八大离子、总盐量、PH 值、碳酸钙含量测定，分析它们在沙堆不同部位的分布特征，初步揭示艾比湖周边怪柳灌丛沙堆的“沃岛”、“盐岛”效应。
4. 初步分析艾比湖流域人类活动对沙堆形态及其发育过程的影响，据此初步判别区域土地退化程度，拟阐明艾比湖周边灌丛沙堆的出现和发展对区域环境变化的指示意义。

2. 研究区概况

2.1 研究区地理概况

2.1.1 研究区位置

艾比湖湿地自然保护区地处新疆博尔塔拉蒙古自治州境内，在行政区划上地跨博州精河县、博乐市和阿拉山口口岸区，总面积 2670.85 km²。

怪柳沙堆在艾比湖周边有较广泛的分布，但是调查发现由于人为破坏和其他因素的干扰，怪柳沙堆很多都已衰败，并且在白刺沙堆以及盐节木沙堆密集分布的区域有零星点缀的怪柳沙堆，另外怪柳沙堆占据的地面多为流沙和裸露的盐碱化土地，植被覆盖率不高。在研究区内怪柳沙堆能够很好地生长并能够稳定流沙以及盐碱化的土地，使荒漠地面保持相对稳定，但是这样的稳定只是暂时的，脆弱的荒漠生态环境生存仍然面临荒漠化的危机。

2.1.2 研究区地形、地貌特征

艾比湖范围于 E82°35′-83°11′，N44° 44′-45°10′内，位于新疆北部准噶尔盆地的西侧，博尔塔拉蒙古族自治州精河县境内，阿拉山口的东南方。湖盆南西北三面环山，东面与准噶尔盆地平原相连，盆地北部是准噶尔西部山地中的玛依力山，西北部是天山山系最北分支阿拉套山。南部是北天山西段的婆罗科努山，山脊线海拔 3500-

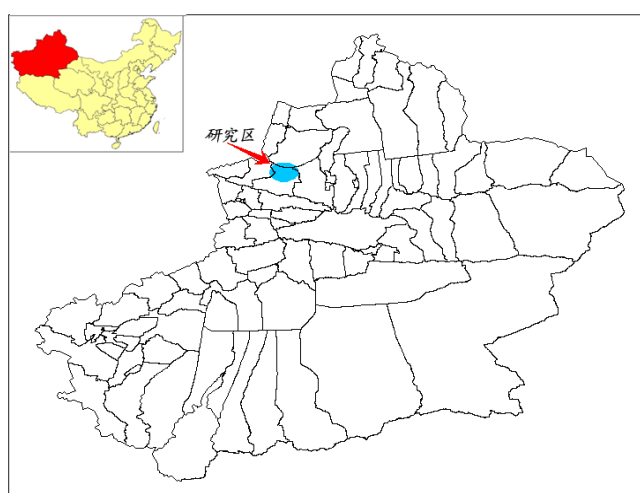


图 2-1 研究区位置图

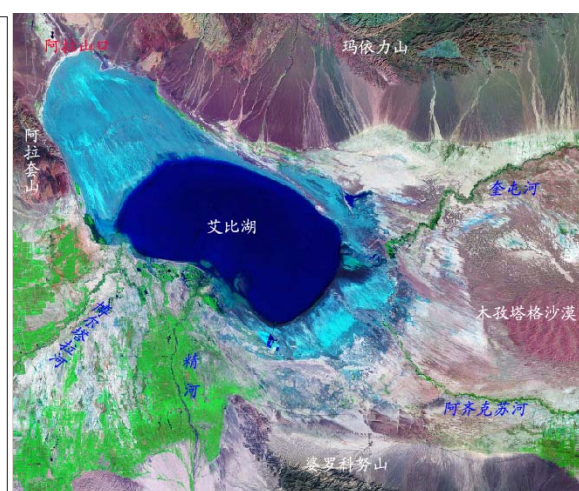


图 2-2 研究区影像图

4500m，最高峰海拔 5500m，为艾比湖流域的最高点。西北部是我国著名的大风口——阿拉山口。目前艾比湖的湖水面积约 522km²，是准噶尔盆地西南地表水

及地下水汇集中心,来自博尔塔拉河、奎屯河、古尔图河、四棵树河、精河、大河沿子河等河流的冰雪融水、降水及地下水汇聚到艾比湖盆地,形成了新疆最大的咸水湖。

艾比湖流域的地貌呈明显的环带状结构,以艾比湖为中心向外,地貌类型依次为现代干涸的湖底平原,古湖积平原、冲积平原、冲洪积平原、洪积扇平原及干燥剥蚀丘陵低山和中高山等,在艾比湖东面和南面发育有总面积超过 1500 km^2 的沙漠^[35,36],其中分布于古湖区的面积占一半以上,沙丘的类型以半固定的垄状沙丘为主,其次为流动性的新月形沙丘。沙丘的迎风方向为西北,移动的方向为东南。在精河县乌-伊公路 387km 附近,形成高 5m-6m 的新月形沙丘,每年由西向东移动 3m-10m 不等^[37]。

2.2 研究区气候水文特征

2.2.1 气候特征

艾比湖流域地处欧亚大陆腹地的中纬度地区,属典型的温带干旱大陆性气候。夏季酷热,冬季严寒,并且常年干旱少雨,空气干燥,风多风大,盐尘和浮尘活动频繁。艾比湖流域光热充足,全年日照时数 2695.9 小时,日照百分率为 61%。年平均温度为 $6-8^{\circ}\text{C}$,最低月均温低于零下 17°C ,最高月均温则达 28°C ,积温 $3000^{\circ}\text{C}-3500^{\circ}\text{C}$,无霜期 160d^[38]。年均降雨量 100mm,最长连续无降水日数 95 天,年蒸发量 3421.3mm,平均相对湿度 53%。蒸发比 1:34^[39]。

由于艾比湖流域位于阿拉山口主风通道区,该山口由西北向东南倾斜,形成落差 150m 上下的狭长谷地,因此形成了这一区域气候的一个突出特点,常年多大风。该区域年均大风(大于 17m/s)日数多达 164d,年均有 8 级以上大风 241h,瞬间最大风速达 55m/s ,年平均风速 6.0m/s 。湖面干缩使得干涸湖底裸露,有 1500 km^2 盐漠化,特别是西北部 500 km^2 干湖底(粒径多为 $0.001-0.5\text{mm}$ 的粉砂和中细砂,沉沙厚度达 200m),在阿拉山口大风的侵蚀下,常形成沙尘暴、扬沙和浮尘天气^[40]。

2.2.2 水文特征

艾比湖自更新世晚期以来,随着气候的变化,蓄水量逐渐减少,特别是二十世纪五十年代以来,因受到人为活动的强烈影响,艾比湖面由五十年代初的 1070 km^2 干缩到五十年代末的 800 多 km^2 ^[37]。现在艾比湖湖面海拔 195m,水域面积 $500\text{ km}^2-700\text{ km}^2$ 之间。艾比湖湖底平坦,属浅水湖;目前平均水深 1.4m,最深 3m。其水资源主要来源于河流及地下水补给^[41]。

艾比湖流域有大小河流 47 条之多,但大多数流出山后逐渐在洪冲积扇上渗

漏消失，水量不能直接流入湖中，而是通过地下潜流的形式或汇入其它河流补给湖泊，流域内有奎屯河、四棵树河、古尔图河、托托河、精河、大河沿子河、博尔塔拉河等七条主要河流，其中以地表径流的形式能直接补给湖泊的河流只有 3 条，即精河、博尔塔拉河和奎屯河。艾比湖区域的地下水比较丰富，湖区周边不少地区都有地下水溢出，形成湖滨沼泽和河成沼泽。山区和山前洪积倾斜平原地下水水质较好，洪积平原、湖积平原潜水矿化度逐步增高，在河流两侧，地下水水质较好，具有供水意义^[41]。

2.3 研究区土壤与植被特征

2.3.1 土壤特征

艾比湖湿地自然保护区地处温带漠境，位于阿拉山口大风主风道上，巨厚的第四纪松散沉积物为风沙运动提供了丰富的沙源。该湿地又是准噶尔盆地西南部的水盐汇集中心，土壤盐渍化过程普遍而强烈。晚更新世以来，湖泊不断萎缩，特别是 20 世纪五十年代以来，急剧干缩，湖周形成了众多的阶地和面积比现水域大得多的干涸湖底。上述独特的自然地理背景，使艾比湖湿地自然保护区不仅形成了各种类型的水成、半水成土壤，而且形成了各种荒漠土、盐碱土、风沙土。

土壤的机械组成在湖积—冲积平原，主要以细砂、粉砂和亚粘土为主，在湖滨三角洲主要以平原粉砂和亚粘土为主，在湖滨平原主要以灰色淤泥质粘土、亚砂土为主。

2.3.2 植被特征

艾比湖流域植被可分为 5 个植被类型，8 个植被亚型，17 种群系。旱生荒漠植物是艾比湖植被的主要成分，受地形、水文等因素的影响，盐生植被、沙生植被、中生、湿生、水生植被也得到发展，形成生物多样性较为丰富的植物群落。在该区域北部、东部及西南的砂砾质、洪积、冲积戈壁以及阿拉山口及湖东部地区生长着茂密的天然梭梭林；在奎屯河、古尔图河、精河、博尔塔拉河各河下游湖滨平原潜水溢出带有胡杨林分布；在冲积扇缘和潜水溢出带有榆树林、柳树林分布；在精河及博河下游有大面积的芦苇沼泽分布，芦苇一般高 3-4 米；在湖东南是以芨芨草为主的盐化草甸；在平原低地还有柳树群落、铃铛刺群落、甘草群落、苏枸杞群落、小獐茅群落；湖滨盐沼泽地有盐穗木群落、盐节木群落、盐角草群落、盐爪爪群落、碱蓬群落、琵琶柴群落^[40]。

由于艾比湖处在极端干旱条件和阿拉山口大风主通道下，因自然与人为因素共同干扰，致使湖水干缩，湖面缩小，水盐运动发生变化，地下水位下降，

土壤盐分增加，荒漠植被严重衰败。艾比湖洼地植被退化的显著特征是，植被群落由湿生、中生向旱生、超旱生和盐生、耐沙生种类演替，一些地段退化为荒芜的风蚀裸地。超旱生小乔木密度降低，植被盖度下降，建群种植株高度降低。

在艾比湖四周，怪柳沙堆在河流入湖口、泉水河区，以及南北山麓洪冲积扇缘上均有分布。影响怪柳分布和生长的微地形、气候、土壤等各种生态因素并不是单独起作用的，而是相互影响和相互制约，综合发生作用的。其中环境水分条件是影响怪柳能否生存和生长的一个关键性因素。怪柳的前期生长必须要有一个湿润的环境，成株后，由于根系发达，对地表水的依赖降低。一般来说，成熟怪柳个体的最适地下水位是 5m 以上，随地下水位的下降，其生长势逐渐变差，至 10m 以下时，大多数怪柳很难生存。这也是怪柳种群多分布于河岸、滨湖、扇缘和低洼地的原因。

3. 研究方法与数据处理

3.1 野外调查与样品采集

3.1.1 沙堆测量

在研究区内选择灌丛沙堆较为典型的地段，采用样线与样方相结合的调查与测量。样方面积依据沙堆大小分别为 100 m×100 m 和 50 m×50 m，再以样地一个角为原点，其（x，y）坐标定为（0，0），然后测定样地内每个沙堆的相对坐标值。采用卷尺以及罗盘仪测量沙堆形态，主要包括灌丛沙堆的长轴、短轴、走向、迎风坡长与坡角、背风坡长与坡角、沙堆高度。用全球定位系统（GPS）定位。沙堆体积用球冠体积估算

$$V=\frac{1}{6}\pi H\left[3\left(\frac{1}{2}\left(\frac{L}{2}+\frac{W}{2}\right)\right)^2+H^2\right]$$

其中H为沙堆高度，L为长轴，W为短轴。

3.1.2 土壤采样

柽柳沙堆表面土壤采样顺序按照迎风坡坡脚、坡中、坡顶，背风坡坡中、坡脚的顺序采样，丘间地按照迎风坡丘间地、背风坡丘间地顺序采样共计 91 个粒度样品。

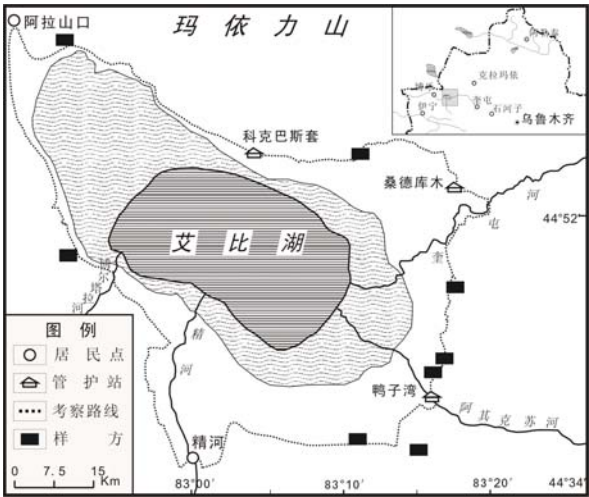


图 1 研究区及采样观测位置

Fig.1 Study area and sampling observational points

在调查及采样过程中，用全球定位系统(GPS)定位，记录各样地海拔、土壤等环

境因子（图 1）。

沙堆的纵剖面采样从底层到顶部具有明显层理的堆积层采样并详细描述各层理颜色、粒度、结构、构造、倾角、和生物沉积等属性，测量每层厚度和整个剖面高度，用 GPS 和罗盘精确记录各剖面的经纬度、朝向方位，详细编号所有样品按粒度、磁化率、地化元素、养分分析等指标的要求进行采样，同时进行测年数据 ^{14}C 和光释光测年样品的采集。

3.1.3 植被调查

在样方内，实测样地沙堆植物其株高、冠幅、盖度，记录沙堆上的伴生植物以及植物覆盖度，同时统计样方内丘间地植物的株数、盖度、株高、冠幅。

3.2 样品处理与实验室分析

3.2.1 粒度测定

对于采集的土壤样品进行粒度测定，方法如下：

（1）对于采集回的土样首先进行实验前预处理：将野外采集的样品放在室内自然风干，以去除水分，块状样品变得较松散；根据颗粒物的不同，选取相应量样品，以保证测量时样品溶液浓度能维持在 10%—20% 之间，粘土样品取 0.5 g，沙土样品取 1.0 g 左右。样品中先加入 10 ml (10%) 的双氧水，放加热板加热至沸腾直至完全去除有机质，再加 10 ml (10%) 盐酸，加热煮沸直至去除样品中的碳酸盐物质，待不出现气泡时，将烧杯从加热板取出；加满蒸馏水将样品静置 12 h 以上，使颗粒物沉降于烧杯底部，轻轻倒掉上部液体和植物残体，注意不让颗粒损失；加入 10 ml 分散剂六偏磷酸钠 (1000 ml 水溶 30 g)，使颗粒充分分散。

（2）使用 Malvern 公司的 Mastersizer2000 激光粒度仪进行粒度分析：取经过处理的适量样品加入到样品池的分散剂（水）中，经超声波检测重复测量，得到稳定的粒度分布曲线（同时提供颗粒体积分布数据和图形、平均值、中值、峰值等大量信息）。仪器的有效范围是 0.02–2000 μm ，在此范围内获取粒度参数，然后选用 Folk and Ward (1957)^[43] 粒度分布特征参数公式，运用 GRADISTAT 软件求出粒度参数：平均粒径，标准差，偏态，峰态。

（3）粒度参数的计算采用福克和沃德公式：

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}; \quad \sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}; \quad K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

$$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

式中: M_z —平均粒径 (mm); σ —分选系数; S_{ki} —偏态; K_g —峰态; Φ_{16} 、 Φ_{50} ……—概率累积曲线上第十六、第五十……百分数所对应的 Φ 值粒径。

3.2.2 土壤化学性质测定

对于采集土壤样品进行化学性质测定 (包括土壤八大离子、有机质、速效养分、碳酸钙测定), 共测定 98 个样品, 方法如下:

(1) 土壤 CaCO_3 的测定 (中和滴定法)

称取过 0.25 mm (60 目) 筛土样约 5 g, 置于 50 ml 烧杯 + 0.5 mol/L HCL 溶液 30 ml 摇匀, 盖表面玻璃, 小火加热, 微沸 5 min 以赶尽 CO_3 。冷却后过滤至三角瓶中, 重复用蒸馏水冲洗滤纸达到纸上杂质无酸残留 (每次冲洗加水不超过 10 ml)。滤液中加入酚酞 (1 滴/10 ml) 3 至 4 滴, 用 0.5 mol/L NaOH 溶液滴定至粉红色或者出现红棕色浑浊, 记录体积消耗 NaOH 溶液的体积 V 。

计算公式: $\text{CaCO}_3 (\%) = C \times (V_0 - V) \times 0.05 \times 100 / m$

式中 C 为 HCL 的浓度 (mg/L); V_0 为加入盐酸的体积 (ml); V 为滴定样品的体积 (ml); m 为土样质量 (g); 0.05 为 $\frac{1}{2}\text{CaCO}_3$ 的摩尔质量 (kg/mol)。

(2) 土壤 pH 值测定

称取通过 1 mm 孔径筛子的风干土 10 g, 放入 50 ml 烧杯中, 加入蒸馏水 10 ml 用玻璃棒搅拌 1 分钟, 使土体充分散开, 放置半小时, 此时应避免空气中有氨或挥发性酸的影响, 然后用酸度计测定。

(3) 土壤电导率测定

称取过 1mm 筛风干土 4.00 g, 置于 25 mm×200 mm 干燥试管中, 加入蒸馏水 25 ml (水土比 5: 1), 盖紧皮塞, 振荡 3 分钟, 静置澄清, 直接测定。测量溶液温度, 然后用电导仪测定, 测定待测液的电导度 (S_t), 等待读数稳定, 记下读数。结果计算:

土壤浸出液电导率 EC_{25} = 电导度 (S_t) × 温度校正系数 (f_t) 电导电极常数 (K)
温度校正系数 (f_t) 可以查书附表, 电导电极常数 $K = EC / S$ (EC —KCl 标准溶液的电导率; S —测得 KCl 标准液的电导度)

(4) 土壤有机质 (重铬酸钾—外加加热法)

①称过 0.149 mm 土样 0.1~0.5 g 至消化管, 加入 10 ml 重铬酸钾—硫酸混合液溶液, 摇匀; ②放入消煮炉, 等所有消化管中气泡均匀后准确计时 5 min; ③完全洗入三角瓶中, 加 4 滴邻啡罗啉指示剂开始滴定; ④用 0.2 mol/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 滴定最后一两滴时用洗瓶把三角瓶壁清洗一下, 可减少误差; ⑤颜色变化为: 橙黄→蓝绿→砖红色; 每批样要 3 个空白样, 每天都要对 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 标定一次: 0.2 g 重铬酸钾溶于 50~70 ml 水 + 5 ml 浓硫酸 + 4 滴邻啡罗啉指示剂。

计算公式： $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ （浓度）= $0.2000 / (\text{消耗的体积数} \times 0.04904)$ ppm
 有机质(g/kg) = $[\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{浓度}) \times (V_0 - V) \times 10^{-3} \times 3 \times 1.1 \times 1.724 \times 1000] / m$
 式中 V_0 为空白的滴定体积 (ml); V 为样品的滴定体积 (ml); m 为土样重量 (g);
 3 为 $1/4$ 碳原子摩尔质量 (g/mol); 1.1 为氧化校正系数 (加 Ag_2SO_4 为 1.04, 不加为 1.1); 1.724 为土壤有机碳换算成有机质的平均换算系数。

(5) 土壤总盐 (八大离子: CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)

八大离子均是按水土比为 5:1 称 1 mm 土样 40 g + 200 ml 水, 振荡 30 min 得到的过滤溶液;

① CO_3^{2-} 的测定: 吸滤液 20 ml + 1 滴酚酞 (显色说明存在 CO_3^{2-}) 用稀硫酸滴定, 红色→无色; 到终点;

② HCO_3^- 的测定: 续上一步骤, 再加 1 滴甲基橙, 用稀硫酸滴定, 橙黄色→橙红色到终点。

③ Cl^- 的测定: 续上一步骤, 再加 3 滴铬酸钾, 用 AgNO_3 滴定, 橙红色→砖红色, 到终点。

④ Ca^{2+} 的测定: 吸滤液 20 ml + 1 滴管 NaOH + 钙红少许, 用 EDTA 滴定, 淡紫色→清亮的蓝色; 到终点;

⑤ $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的测定: 吸滤液 20 ml + 5ml 氨性缓冲液 (PH 10) + 铬黑 T, 用 EDTA 滴定, 淡紫色→清亮的蓝色; 到终点;

⑥ SO_4^{2-} 的测定: 吸滤液 10 ml + 5 ml Na_2SO_4 + 10 ml 95% 乙醇 + 1 滴管 1:1 乙酸 + 1 滴茜素红, 用氯化钡滴定, 淡黄色→淡红色; 到终点;
 加 5 ml Na_2SO_4 的原因是为了使变色更明显。

计算公式:
 $\text{CO}_3^{2-} = 0.03 \times (2 \times V \times c \times t_s \times 100) / m$
 $\text{HCO}_3^- = 0.061 \times ((V_2 - V_1) \times c \times t_s \times 100) / m$
 $\text{Cl}^- = 0.03545 \times (V \times c \times t_s \times 100) / m$
 $\text{SO}_4^{2-} = 0.048 \times (V_2 + V_3 - V_1) \times c \times t_s \times 2 \times 100 / m$
 $\text{Ca}^{2+} = (0.02 \times V \times c \times t_s \times 2 \times 100) / m$
 $\text{Mg}^{2+} = 0.0122 \times (V_2 - V_1) \times c \times t_s \times 2 \times 100 / m$

K^+ 、 Na^+ = 阴离子总和 - ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 或用火焰分光光度计测定

土壤水溶性 K、Na 含量 ppm = $\rho (\text{K}, \text{Na}) \times 10 \times t_s / (1000 \times m)$

式中 $\rho (\text{K}, \text{Na})$ 为质量浓度 (ug/ml); 10 为待测液体积 (ml); t_s 为分取倍数;
 m 为烘干样品质量 (g)。

总盐分 = $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$

3.2.3 桤柳沙堆土壤特征富集系数

桤柳沙堆养分土壤特征可表示为:

$$E=C/O$$

式中, E 为养分富集系数, C 为桉柳沙堆平均值、 O 丘间地平均值。 $E>1$, 说明该土壤属性值在灌丛下富集, 相反则在丘间地富集。

3.3 实验数据获取及处理

运用 GRADISTAT 软件求出粒度参数: 平均粒径, 标准差, 偏态, 峰态。

对室内实验获取的数据, 利用经典统计学的原理与方法, 运用 Excel 2003 进行初步整理, 而后利用统计分析软件 SPSS13.0, 提取相关参数, 研究参数的变化规律。

4. 艾比湖周边怪柳沙堆形态特征

4.1 艾比湖周边怪柳沙堆形态特征

4.1.1 艾比湖周边怪柳沙堆总体形态特征

怪柳一般在平地上生出幼苗以后，随着怪柳年龄的增长会逐渐聚集各方面吹来的沙土或其它物质形成一个沙堆。其被沙土埋住的茎部会形成不定根，起到吸收和运输养分的作用。研究区内怪柳沙堆是近圆形或椭圆形凸起的独立型沙包，丘顶浑圆，在主风方向的迎风面坡度较缓，背风坡较陡，坡上的部分与自然沙丘不同，它不会形成坡度很陡的落沙坡，而是形成一个相对平缓的圆顶，这主要是怪柳的根系和地上部分枝条固持沙土的结果。大部分沙堆为独立型；沙堆迎风坡遭受侵蚀而导致露根后退，沙堆表层有结皮，植被生长良好；沙堆长轴为16.42 m，短轴9.00 m，沙堆高度在0.75 m-3.00 m之间，迎风坡坡角与背风坡坡角相差不大，背风坡长度普遍大于迎风坡长，个别沙堆有风影沙尾，植株高度在2.20 m-5.15 m不等（见表4-1）。

艾比湖是温带大陆性干旱气候，是准噶尔盆地西南地表水及地下水汇集中心，其地势低洼，蒸发强烈，地表土壤盐分聚集，普遍有不同程度的盐结皮，地下水位上升时，表层土壤开始脱盐，地下水位下降时，蒸发强烈，地表又开始聚盐。阿拉山口在其西北部，年平均大风($\geq 17\text{m/s}$)日数多达164天，最多185天，瞬间最大风速 55m/s ，风力强大。艾比湖湖面不断退缩引起湖底裸露，在阿拉山口大风的作用下沙源扩大，所以艾比湖周边的怪柳沙堆是在盐化作用、脱盐作用与风沙作用交集下形成的。

表 4-1 艾比湖周边怪柳沙堆总体形态特征统计

Tab.4-1 The shape character of *tamarix nabkhas* around Aibi lake

类型	形态参数	最小值	最大值	平均值	标准差
艾比湖 怪柳沙堆	L(m)	6.40	36.00	16.4214	8.1000
	W(m)	2.90	19.20	9.0036	4.1645
	H(m)	0.75	3.00	1.6614	0.6285
	α°	6.00	16.00	10.8750	2.8876
	β°	5.00	18.00	9.9286	3.3879
	Ls(m)	3.00	17.30	8.2393	4.2316
	Ll(m)	3.30	21.50	9.9286	3.3879
	Hp(m)	2.20	5.15	3.2864	0.8211

4.1.2 艾比湖周边不同区域怪柳沙堆形态特征对比分析

在桑德库姆管护站以西（E83° 11′ 9.88″ N44° 59′ 17.38″ ），相对高度为 206 米处，玛依力山的洪积扇前缘，发现“残余怪柳沙堆”。在残余怪柳沙堆上，怪柳非常苍老，枯枝落叶层因风蚀很多外露，并且其嫩枝较少，老枝较多，有的已经完全枯死，形成“秃丘”。根据湖滨地貌和阶地初步推断，这里的“残余怪柳沙堆”在晚更新世末次盛冰期时就已发育形成，当时全球气候干燥寒冷，其西北部是阿拉山口多风地段，怪柳灌丛阻挡风沙形成沙堆。到了全新世，气候变暖，冬季风减弱，这片沙堆西侧的洪积扇加高扩大，同时洪积扇之间低洼地段植物长势良好，因而沙源供给逐渐匮乏，沙堆发育减缓甚至停止，当降水增加时，怪柳沙堆冲刷严重，形成残余沙堆。

在艾比湖东南角、鸭子湾管护站以北（E83°20′48.97″ N44°39′27.99″）为近现代发育的怪柳沙堆，因其在铁路等交通要道的边缘，所以人为活动破坏严重，很多破坏

表 4-2 新疆艾比湖周边不同发育阶段怪柳灌丛沙堆形态特征统计

Tab.4-2 Summary of different developmental stage of *tamarix nabkhas* in Aibi Lake of Xinjiang

类型	形态参数	最小值	最大值	平均值	标准差
近代怪柳沙堆	L(m)	6.40	36.00	15.0846	7.6815
	W(m)	2.90	19.20	8.2885	3.7087
	H(m)	0.75	3.00	1.6365	0.5974
	α°	6.00	16.00	11.0000	2.7604
	β°	5.00	18.00	9.5769	3.2579
	Ls(m)	3.00	17.30	7.6385	3.8862
	Ll(m)	3.30	21.50	8.6962	4.5912
	Hp(m)	2.35	5.15	3.4071	0.7489
残余怪柳沙堆	L(m)	15.60	23.70	19.0800	3.0532
	W(m)	8.40	13.60	10.8800	1.8152
	H(m)	1.20	2.00	1.5840	0.2781
	α°	7.00	13.00	9.5000	2.6247
	β°	5.50	10.00	8.2000	1.6866
	Ls(m)	5.50	14.10	9.0800	3.1968
	Ll(m)	8.20	11.60	9.9800	1.3239
	Hp(m)	2.20	3.15	2.6240	0.3534

严重的怪柳沙堆形态不规则，近代怪柳形态特征与残余怪柳沙堆(E83°11′48.97″ N44°59′17.38″)的形态特征对比从表 4-2、图 4-1 可以看出，怪柳沙堆长轴与短轴平均长度 < 残余怪柳沙堆长轴与短轴平均长度，怪柳沙堆平均高度 > 残余怪柳沙堆平均高度，并且怪柳沙堆坡度 > 残余怪柳沙堆坡度，近现代怪柳沙堆其植被覆盖度为 70%，而残余怪柳沙堆覆盖度仅 10%，这表明这两种沙堆在时间上差异很大，残余怪柳沙堆经过较长时间的雨水冲刷以及风蚀使坡度变缓，高度变矮，怪柳生长也处在衰败阶段。依据 Tengberg^[2]（1998）提出的灌丛沙堆演化阶段可以确定近代怪柳沙堆处于稳定生长阶段（植物生长良好），而残余沙堆处于衰亡阶段（植物衰退消亡）。

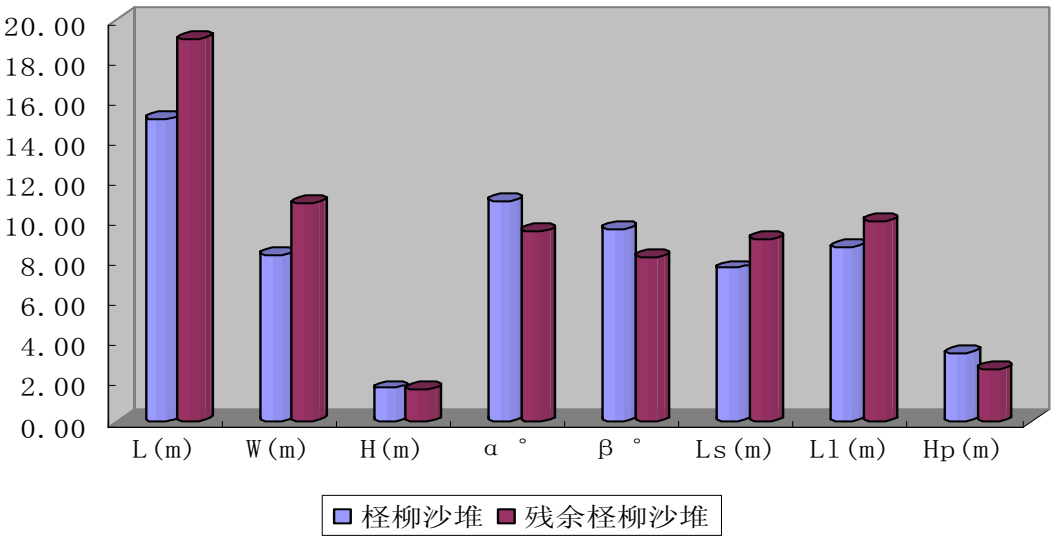


图 4-1 艾比湖周边不同区域怪柳沙堆形态特征变化
Fig.4-1 Changes on different positions of *Tamarix*

4. 1. 3 艾比湖周边怪柳沙堆与其它类型沙堆形态特征对比分析

从怪柳沙堆的形态特征统计中可知（表 4-3）：怪柳沙堆长轴平均长为 16.05m，短轴平均长为 8.85m；平均高度为 1.65m，最大高度为 3m，迎风坡坡角平均值为 11°左右，背风坡坡角的平均值为 10°左右，最大坡度 18°；迎风坡坡长平均为 8.1m，背风坡坡长平均为 9.0m，总体形态呈现近似椭球形。

从表 4-3 可以看出艾比湖周边怪柳沙堆与梭梭沙堆、白刺沙堆的形态表现出明显差异。沙堆平均高度依次为：怪柳沙堆 > 白刺沙堆 > 梭梭沙堆，而其坡度依次为怪柳沙堆 < 梭梭沙堆 < 白刺沙堆。样本植株平均高度依次为怪柳（1.75m）> 梭梭（0.76m）> 白刺（0.34m），虽然梭梭株高大约 0.8m 左右，而白刺株高仅有 0.4m 左右，但是白刺沙堆的高度却远大于梭梭沙堆，这种差异主要与其生态特性有关。梭梭根系发达，水平根浅，根系伸展达 10 m，能吸取地

表下 1m 以内水分; 垂直根系一般深为 5m 或更多, 能吸取 1-10m 以内的深处水分^[40], 但梭梭茎基通常不能形成沙堆, 只有当其植株倾斜而大量枝条伏贴地表时, 才可能形成高 70cm, 直径不足 1m 的沙堆。Danin.A^[42]指出梭梭被沙埋后, 土壤若极度干燥就不能产生不定根, 只有在有效降水的情况下不定根才易生长。梭梭虽有明显的主干, 但不丛生, 因此通透性好, 有效拦沙率较低。而怪柳阻沙能力强, 植株被沙埋后, 被埋枝条上很快就生出不定根, 地上部萌发更多新枝, 阻挡风沙。白刺枝叶十分茂密, 常匍匐地面生长, 多分枝, 枝条在被沙埋土掩之后, 极容易向下生出不定根, 向上萌生不定芽, 枝端也继续向上生长, 其通透性差, 拦截风沙率比梭梭较好, 因此虽然梭梭植株较白刺高, 但沙堆高度相对白刺较矮。怪柳与白刺属于同一生态位^[43], 所以其沙堆形态主要决定于植株外形、密度和生长状况。

表 4-3 新疆艾比湖周边不同类型灌丛沙堆形态特征统计

Tab.4-3 The shape character of different types of nabkhas surveyed in the Aibi Lake of Xinjiang

类型	形态参数	最小值	最大值	平均值	标准差
怪柳沙堆	L(m)	6.40	36.00	16.4214	7.5243
	W(m)	2.90	19.20	9.0036	3.8016
	H(m)	0.75	3.00	1.6614	0.5941
	α°	6.00	16.00	10.8750	2.7697
	β°	5.00	18.00	9.9286	3.1179
	Ls(m)	3.00	17.30	8.2393	4.0456
	Ll(m)	3.30	21.50	9.9286	4.3202
	Hp(m)	2.35	5.15	3.2864	0.7489
白刺沙堆	L(m)	2.36	15.60	6.0950	2.4549
	W(m)	1.20	12.80	4.2228	2.0044
	H(m)	0.24	1.95	0.8756	0.3993
	α°	6.00	34.50	20.6860	5.0575
	β°	4.50	37.00	18.3010	7.6291
	Ls(m)	1.10	7.00	2.8673	1.1515
	Ll(m)	1.20	8.60	3.6378	1.6081
	Hp(m)	0.40	2.40	1.2145	0.4258
梭梭沙堆	L(m)	1.00	5.70	2.7640	1.1886
	W(m)	0.50	3.70	1.7054	0.8188
	H(m)	0.10	0.90	0.4100	0.2481
	α°	6.50	32.00	17.2200	7.0785
	β°	4.00	33.22	18.3600	8.3560
	Ls(m)	0.50	3.65	1.5352	0.8284
	Ll(m)	0.40	2.50	1.4144	0.5179
	Hp(m)	0.60	2.40	1.1744	0.4422

由此可以看出在外界条件相同的情况下, 植被可以成为决定性因素, 不同植被类型会形成不同的沙堆形态。

4.2 怪柳沙堆形态特征参数关系

在对研究区怪柳沙堆形态特征进行统计分析的基础上, 并对形态参数之间进行了 Pearson Correlation 分析 (见表 4-4), 对各参数之间的关系根据相关系数 $|r|$ 的大小进行了分级: 当 $|r| < 0.3$ 时, 为微弱线性相关; 当 $0.3 \leq |r| \leq 0.5$ 时, 为低度线性相关; 当 $0.5 < |r| \leq 0.8$ 时, 为显著线性相关; 当 $|r| > 0.8$ 时, 为高度线性相关。

4.2.1 沙堆形态参数关系

从分析结果来看, 新疆艾比湖流域怪柳沙堆, 怪柳沙堆的长轴和短轴之间的相关系数在0.01显著水平为0.835, 可见怪柳沙堆的长轴长度和短轴之间存在着极强的正相关关系, 即在怪柳沙堆发育过程中, 水平尺度上长轴和短轴为协同增长。从怪柳沙堆的水平尺度和垂直高度的关系上来看, 长轴与沙堆高度的相关系数在0.01显著水平上为0.675, 短轴和沙堆高度的相关系数为0.542, 可见不论是长轴长度还是短轴长度均与高度在0.01显著水平上都为显著线性相关关系, 但是长轴的长度与沙堆高度之间的关系比短轴的长度与沙堆高度之间的关系更密切。这也证实了前人研究认为灌丛沙堆的长度、宽度高度之间存在一定的相关性, 其中长度和宽度之间的相关显著, 可以得出长度与宽度协调增长和变化; 而高度与长宽的相关性, 相对来说就不是很显著的观点^[2]。Hesp(1981)指出沙堆的高度取决于沙堆底座的宽度和沙子的休止角, 而沙堆的长度取决于沙堆的宽度和风速。

Tengberg(1995)研究Acacia沙堆和Balanites沙堆时也发现沙堆的水平尺度与沙堆的高度之间存在着明显的线性关系。岳兴玲(2005)研究了中国内蒙古高原东南部的灌丛沙堆后也得出沙堆高度与沙堆的水平尺度之间的正相关程度较好, 认为沙堆形态在空间上协调增长。在0.01显著水平下, 怪柳沙堆迎风坡坡角与植株高度表现为微弱线性相关, 与其它特征参数表现为不相关; 背风坡坡角与沙堆各特征参数表现为不相关。怪柳沙堆长轴与迎风坡长、背风坡长的相关系数在0.01显著水平下分别为0.905、0.934, 都为高度线性相关。沙堆高度与体积相关系数在0.01显著水平下为0.751, 表现为显著线形相关, 说明沙堆体积随高度增加的趋势稳定并趋于减缓。

4.2.2 怪柳灌丛和沙堆形态参数关系

由4-4统计分析表中可看到, 在0.01显著水平下, 怪柳灌丛株高与长轴相关

系数为0.520, 冠幅与长轴的相关系数为0.524, 都为显著线性相关。株高与沙堆高度相关系数在0.01显著水平下为0.847, 为高度线性相关; 植株高度与沙堆体积在0.01显著水平下, 相关系数为0.637, 表现为显著线形相关。冠幅与沙堆高度的相关系数为0.373, 为微弱线形相关; 与沙堆体积相关系数为0.509, 为显著线形相关。总体来说, 怪柳灌丛的植株高度与沙堆迎风坡长、背风坡长、长轴、短轴、沙堆体积在0.01显著水平下都表现为显著线性相关。在此区域怪柳的植株高度与冠幅都影响着沙堆的高度, 但植株高度显得更为主要。

依据 Tengberg (1998) 在非洲突尼斯对灌丛沙堆的形态进行回归分析的基础上, 提出的灌丛沙堆发育的三阶段模式^[2], 可以确定艾比湖周边怪柳沙堆在河流入口处处于稳定阶段, 在玛依力山洪积扇扇缘的残余怪柳沙堆处于衰退阶段。它们的沙堆水平尺度与高度相关性不显著, 但是河流入口处怪柳生长良好, 但洪冲积扇缘的沙堆怪柳呈现衰败, 许多沙堆都只有枯枝盘根在沙堆上呈现。

4.3 小结

研究区怪柳沙堆主要分布在河流入口处及南北山麓洪积扇扇缘, 是在盐化作用、脱盐作用与风沙作用交集形成的, 由于艾比湖湖面不断地萎缩, 风力强大, 沙源充足, 因此灌丛沙堆的存在短期内有效减缓了周边土地荒漠化的进程。由于区域差异引起的沙源和风力的不同, 可直接导致区域内所形成的灌丛沙堆形态特征存在明显差异。并且在同一区域内因植被类型的不同, 由此形成的沙堆形态也会不同。

研究区怪柳灌丛与沙堆形态特征参数有良好的相关性, 具体表现为沙堆长轴与短轴、迎风坡长与长轴和短轴之间在 0.01 的显著水平下相关性为高度相关; 沙堆高度与长短轴显著相关。怪柳沙堆迎风坡坡角与植株高度表现为微弱线性相关, 与其它特征参数表现为不相关; 背风坡坡角与沙堆各特征参数表现为不相关。株高与沙堆高度为高度线性相关; 植株高度与沙堆体积表现为显著线形相关; 冠幅与沙堆高度微弱线形相关; 与沙堆体积为显著线形相关。因此总体上株高在影响沙堆高度及沙堆体积中占主要地位, 冠幅虽也有影响, 但相比株高而言影响较弱。

研究区怪柳沙堆在河流入口处处于稳定阶段, 在玛依力山洪积扇扇缘的残余怪柳沙堆处于衰退阶段, 并且稳定只是暂时的, 如果研究区怪柳沙堆植物遭到人为破坏, 或因环境变迁植物衰退, 沙堆就会遭受风蚀进入活化阶段, 区域生态环境可能进一步恶化。

表 4-4 新疆艾比湖周边怪柳沙堆形态参数相关分析结果

Tab.4-4 The morphometric parameter of different types of nabkhas correlation analysis in Aibi Lake of Xinjiang											
类型	形态参数	L	W	H	H _p	α	β	L _s	L ₁	v	Hc
怪柳沙堆	L	1									
	W	0.835 (**)	1								
	H	0.675 (**)	0.542 (**)	1							
	H _p	0.564 (**)	0.512 (**)	0.847 (**)	1						
	α	- 0.210	0.021	0.164	0.449 (**)	1					
	β	- 0.018	0.113	0.254 (*)	0.208	0.442 (**)	1				
	L _s	0.905 (**)	0.737 (**)	0.700 (**)	0.522 (**)	- 0.284 (*)	0.077	1			
	L ₁	0.934 (**)	0.815 (**)	0.677 (**)	0.617 (**)	-0.014	-0.009	0.776 (**)	1		
	v	0.916 (**)	0.875 (**)	0.751 (**)	0.637 (**)	-0.114	0.059	0.835 (**)	0.864 (**)	1	
	Hc	0.520 (**)	0.525 (**)	0.373 (**)	0.571 (**)	0.216	-0.144	0.371 (**)	0.523 (**)	0.509 (**)	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

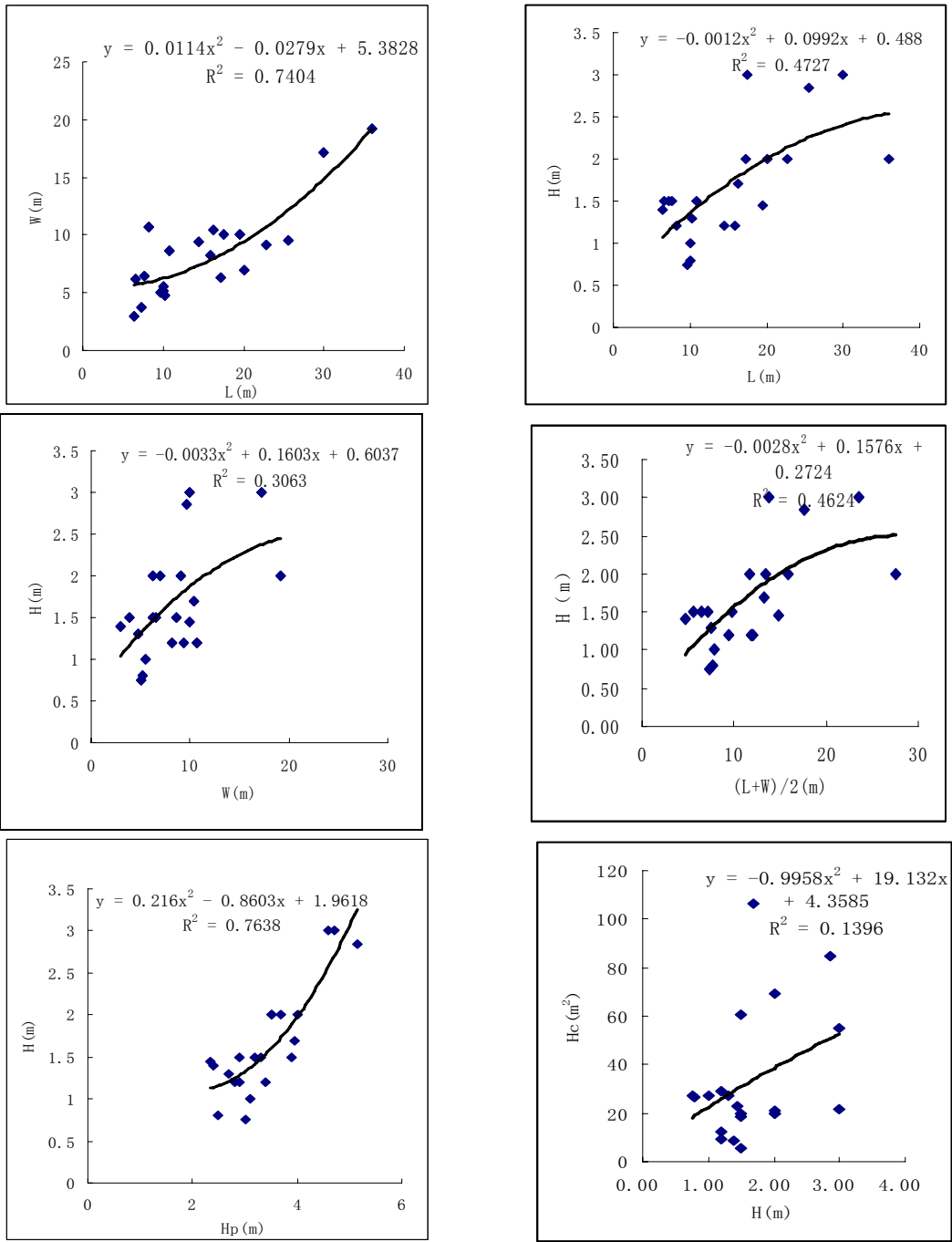


图4-2 艾比湖周边怪柳沙堆形态参数相互关系

Fig.4-2 Relation between morphologic parameters of *tamarix nabkhas* around Aibi Lake

5 艾比湖周边怪柳沙堆粒度特征分析

怪柳沙堆表层沉积物在迁移和运动过程中产生沉积物分选，使其组成与性质在小区内发生变化。一般而言，沉积物粒度变化主要受搬运介质、搬运方式、沉积环境等多种因素控制，因而结合特定区域环境特点，粒度分析在一定程度上能反映沉积物的成因，对揭示区域气候变化与环境演变有重要意义^[44]。

5.1 艾比湖周边怪柳沙堆表层沙物质机械组成

5.1.1 粒径分级

粒度标准，即人们所能通用的粒度标定方法。国内外，各部门流行的粒度标准有二十余种，在地质部门，一般认为伍登—温德华标准比较合适。它是以毫米为单位，2 为底数，以 2 的 n 次方，向两端扩展，形成以 1 为基数，2 为公比数的等比级数数列。土壤学上所说的土粒（简称）大小，并非土粒真实直径，而是人为的把土粒直径当成理想球体的直径对待，这样在实际中更便于研究。确切的说叫做“当量粒径”。根据粒径大小及理化性质差异，把土粒分为若干组，每组即为一个粒级，该组内粒径大小成分及性质基本相近，而与组间有明显的差异。目前国内外存在不同的粒径分级标准，但主要分为石砾、沙粒、粉粒和黏粒等四大基本粒级。本文中粒度数据采用伍登—温德华— ϕ 值标准。

5.1.2 怪柳沙堆表层粒度组成

研究区怪柳沙堆沉积物主要是以极细砂（占 34.60%）为主，其次是细砂（占 21.90%），再次是粗粉砂（占 13.21%），极粗砂含量最少（占 0.08%）。其余各粒级组分含量由大到小依次为：细粉砂、粗粘土、极细粉砂、中粉砂、中砂、细粘土、粗砂（见表 5-1）。这种情况说明本地区能够产生大量风蚀的沙土粒径范围区间主要集中在 0.063 mm—0.25 mm。

怪柳沙堆表面不同部位沉积物粒度分析结果显示（表5-2，图5-2）：迎风坡基部与迎风坡中部粒级组分含量由大到小依次是粉砂、极细砂、细砂、粘土、中砂、粗砂、极粗砂；而后由坡顶到背风坡坡中再到背风坡基部粒级组分含量由大到小依次是极细砂、粉砂、细砂、粘土、中砂、粗砂、极粗砂；经迎风坡基部到迎风坡坡中，粘土、极细砂与细砂含量逐渐增大，而粉砂、中砂、粗砂、极粗砂含量逐渐减少；至坡顶除极细砂与细砂含量增大以外，其余含量都逐渐减少；从坡顶至背风坡坡中除粘土和粉砂含量增大以外，其余含量都降低，经背风坡坡中至背风坡基部除粘土与粉砂含量减小以外，其余含量都增加，其中

从坡顶到背风坡坡中至背风坡基部极粗砂含量为零。

表 5-1 怪柳沙堆表层及丘间地沉积物机械组成

Tab.5-1 Sediments composition of Tamarix nabkhas surface and interdune

类型	项目	最大值	最小值	平均值	标准差
怪柳沙堆表层	细粘土 (%)	3.79	0.47	1.5057	0.7270
	粗粘土 (%)	19.34	1.56	6.0685	3.4522
	极细粉砂 (%)	19.19	1.53	5.6754	3.8244
	细粉砂 (%)	20.58	2.55	7.1571	3.9825
	中粉砂 (%)	15.47	0.60	5.6606	3.5620
	粗粉砂 (%)	19.79	6.93	13.2071	3.2877
	极细砂 (%)	50.32	10.14	34.5990	9.4971
	细砂 (%)	33.89	2.94	21.8991	7.3186
	中砂 (%)	12.07	0.00	3.4982	3.1907
	粗砂 (%)	7.45	0.00	0.6495	1.4593
	极粗砂 (%)	4.19	0.00	0.0796	0.5255
丘间地	细粘土 (%)	3.97	0.69	1.7204	0.8198
	粗粘土 (%)	17.12	2.76	6.5360	3.6594
	极细粉砂 (%)	19.30	2.81	6.5756	4.0312
	细粉砂 (%)	25.45	4.35	9.1444	5.2774
	中粉砂 (%)	22.22	2.71	9.7852	5.3417
	粗粉砂 (%)	27.56	8.16	15.8026	4.9587
	极细砂 (%)	42.84	5.36	28.2675	9.5674
	细砂 (%)	33.55	2.38	16.9049	8.4630
	中砂 (%)	10.99	0.16	3.7898	2.6962
	粗砂 (%)	13.06	0.00	1.1682	2.6702
	极粗砂 (%)	7.66	0.00	0.3053	1.4712

在沙堆的迎风坡基部，极粗砂、粗砂、中砂三个较粗粒级的含量较之沙堆的其它部位均是最高，这是由风沙流在运行途中，受到沙堆迎风坡的阻挡的结果，风速降低致使较粗的颗粒首先在迎风坡坡脚发生沉降堆积形成的。

5.1.3 丘间地粒度组成

丘间地沉积物粒度组成与沙堆砂相似，但是各组分含量不同，丘间地沉积

物也是以极细砂为主（占28.27%），其次为细砂（占16.90%），极粗砂含量最少（占0.31%）（表5-1，图5-2）。各粒级组分含量由大到小依次为：极细砂、细砂、粗粉砂、中粉砂、细粉砂、极细粉砂、粗粘土、中砂、细粘土、粗砂、极粗砂（见表5-1）。

表 5-2艾比湖周边怪柳沙堆不同部位沉积物机械组成

Table.5-2. Grain size changes on different positions of *Tamarix nabkha*, Aibi Lake

不同 部位	粘土 (%)	粉砂 (%)	极细砂 (%)	细砂 (%)	中砂 (%)	粗砂 (%)	极粗砂 (%)
迎风坡基部	7.47	34.80	31.26	19.55	5.14	1.39	0.39
迎风坡中部	7.68	34.26	33.49	19.74	3.82	1.01	0.01
坡顶	6.21	28.45	38.14	23.46	3.08	0.65	0.00
背风坡中部	8.71	31.52	35.02	22.37	2.35	0.03	0.00
背风坡基部	7.80	29.47	35.09	24.36	3.10	0.18	0.00

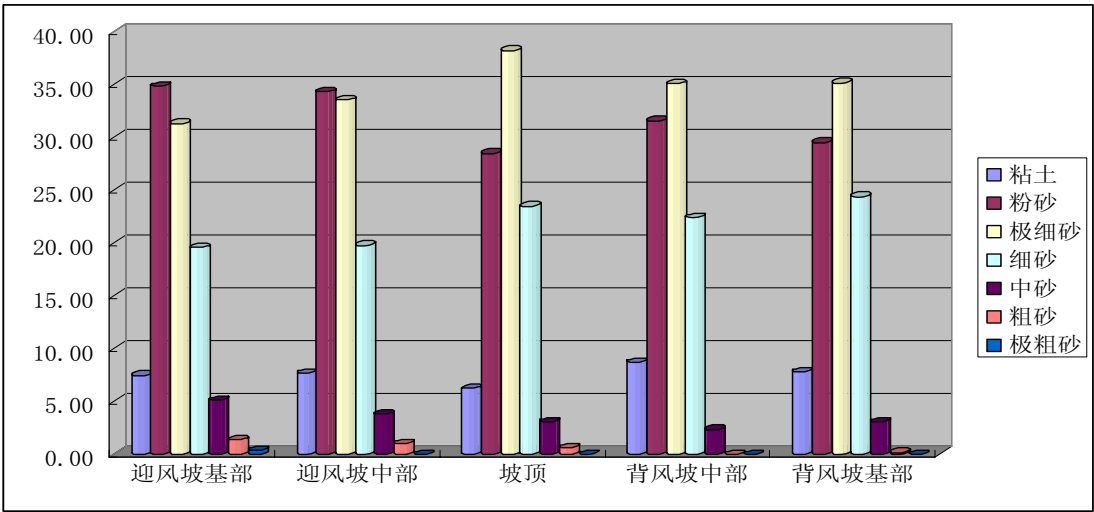


图5-1 艾比湖周边怪柳沙堆不同部位粒度变化

Fig.5-1 Grain size changes on different positions of *Tamarix nabkha*, Aibi Lake

由图5-2可以看出沙堆砂的变化频率大于丘间地砂，沙堆砂的粉砂、中砂、粗砂、极粗砂含量均低于丘间地沙，极细砂与细砂含量高于丘间地。怪柳沙堆与丘间地极细砂与细砂含量较高，表明此地浮尘天气较多，沙物质多来源于远程输送，或者是因为艾比湖不断退缩，地表裸露，气候干燥，植被稀疏，能提供较多的细沙物质，使沙物质组成复杂化。

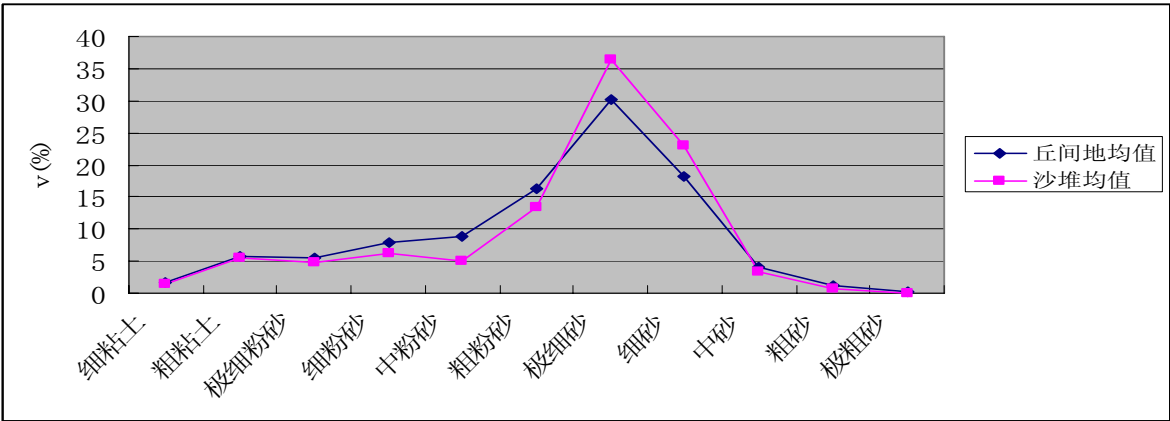


图5-2 艾比湖周边怪柳沙堆表层及丘间地沉积物粒度频率曲线

Fig.5-2 Grain size frequency curves of sediments in *Tamarix nabkha* surface and interdune of Aibi Lake

5.1.4 残余怪柳沙堆及其丘间地粒度组成

在残余怪柳沙堆中，沙堆表层粉砂含量为54.61%，其沉积物含量从高到低依次为粉砂(54.61%)>粘土(16.64%)>极细砂(12.09%)>细砂(9.27%)>中砂(6.60%)>粗砂(0.79%)，极粗砂含量为0。丘间地表层沉积物沙堆表层粉砂含量为72.02%，其余沉积物含量从高到低依次为粘土(19.48%)>极细砂(5.42%)>细砂(2.51%)>中砂(0.50%)>粗砂(0.07%)，极粗砂含量为0。此区域靠近阿拉山口，怪柳生长处于衰败，相对于近代怪柳沙堆，它们的沉积物主要以粉砂以及粘土为主，这可能是因为此地末次冰期时风力强大，在塑造风沙地貌的同时怪柳阻挡风沙形成沙堆，沉积物中粗砂粒逐渐被吹蚀，全新世增暖后，风力频度和强度均有所减弱，沙堆表层蚀余堆积与较弱风力趋于动态平衡，砂质组分也相应减少，而粉砂在空中漂浮最终滞留了下来，这使沙堆的土壤成分发生改变，整个沙堆处于分解的阶段，这也从另一个方面说明了怪柳对风沙上的固定作用。

5.2 艾比湖周边怪柳沙堆粒度特征参数及其关系

5.2.1 平均粒径(Mz)

平均粒径代表粒度分布的集中趋势。但沉积物的平均粒度还在一定程度上取决于源区物质的粒度分布。平均值可以反应沉积物的平均粒度。它主要受两个因素影响：物源物质的原始大小及搬运流体的平均动力能（流速）。怪柳沙堆总体的平均粒径为 4.19Φ ，河流入口处怪柳沙堆的平均粒径为 4.08Φ ，玛依

力山洪冲积扇扇缘怪柳沙堆的平均粒径 5.58Φ。由表 6-3 可以看到,怪柳沙堆不同部位其平均粒径也有所变化,灌丛沙堆不同部位粒度变化反映了风沙流与灌丛相互作用在沙丘各部位的差异性。

从其迎风坡基部经坡中至坡顶,平均粒径依次为4.17Φ、4.10Φ、3.85Φ,粒径逐渐变粗。背风坡坡中与基部平均粒径分别为4.22Φ、4.05Φ,相对于迎风坡颗粒较细。沙堆顶部颗粒最粗,背风坡中部颗粒最细,这可能是因为风速顺着迎风坡爬坡上升到沙堆顶部风速最大,同时人为樵采活动使怪柳沙堆顶部的灌丛大多被破坏,灌丛沙堆顶部失去怪柳灌丛的庇护,因此沙堆顶部大多处于风力较强劲的风蚀状态,沙物质颗粒变粗。沙堆的迎风坡受风力作用强(且风速在迎风坡向上增加),加上怪柳灌丛的阻力,使相对细粒物质由风搬运至背风坡,由于气流在背风坡形成分离回旋流,因而风速减弱,细沙粒便在背风坡上堆积,使在此处沉积使粒径变细。

表5-3 粒度分布图解参数的计算公式和等级 (Folk and Ward, 1957) [45]

平均粒径		分选系数		偏态	峰态
$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$		$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$		$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$
分选等级		偏度等级		峰态等级	
分选极好	<0.35	极正偏	0.3-1.0	很宽	<0.67
分选好	0.35-0.50	正偏	0.1-0.3	宽	0.6-0.90
分选较好	0.50-0.70	近于对称	-0.1-0.1	中等	0.9-1.11
分选中等	0.70-1.00	负偏	-0.3- -0.1	窄	1.1-1.50
分选较差	1.00-2.00	极负偏	-1- -0.3	很窄	1.5-3.00
分选差	2.00-4.00			非常窄	>3.00
分选极差	>4.00				

丘间地沙的平均粒径为 4.30Φ。分析发现,沙堆砂与丘间地砂粒的粒度组成在沙堆顶部相差最大,背风坡基部次之,与背风坡中部相差最小。表明了灌丛沙堆顶部气流波动性较大,随之粒径差别大。这与裸露流动沙丘粒度组成特征相反。

5.2.2 分选(σ)

分选系数代表沉积物的分选状况,分选系数愈小,沉积物的分选性愈好。

按Folk and Ward (1957) 给出的分选程度评价标准, 怪柳沙堆总体的平均分选系数为0.10, 河流入口处怪柳沙堆的平均分选系数0.12, 玛依力山洪冲积扇扇缘怪柳沙堆的平均分选系数-0.14, 都属于分选极好。但是玛依力山洪冲积扇扇缘怪柳沙堆的分选优于河流入口处怪柳沙堆, 可能因为在末次冰期的气候寒冷时期, 艾比湖周边的风力很可能比现在要大, 风沙活动也比现在频繁得多, 同时气候干旱, 区域植被覆盖较少, 风动力可以更加充分地在地面砂物质进行吹扬分选, 所以残余沙堆砂的分选性也极好。由表6-3可以看出, 其表层沉积物的分选以沙包顶部的分选最差, 背风坡的坡脚和坡中的分选比对应的迎风坡的坡脚和坡中各部位略好。可见, 以沉积作用为主的沙包背风坡比以侵蚀作用为主的迎风坡的分选好^[46]。丘间地砂的分选系数在-0.12—0.34之间, 平均分选系数为0.08, 也属于分选很好, 但相比之下丘间地砂的分选好于怪柳沙堆砂。

怪柳沙堆砂的分选程度虽然普遍很好, 但沙堆不同部位因风力作用特点以及沙堆发育阶段差异, 分选性仍然存在一定的差别。在沙堆顶部分选最差, 反映了沙堆顶部植物干扰风沙流、砂粒被拦截后混杂堆积的效果; 其次是迎风坡中部、迎风坡基部, 分选最好的是背风坡中部, 这种规律与平均粒径变化趋势一致, 反映了风沙流在翻越和环绕灌丛沙堆运行过程中, 气流在不同地貌部位的波动对沙物质分选的影响。地处上风区阿拉山口附近的怪柳沙堆大部分处于风蚀退化状态, 因其年代久远, 风力作用过程及时间持久, 其沙堆砂物质的分选性很好。

表 5-3 艾比湖周边怪柳沙堆表面不同部位及丘间地粒度特征参数

Tab.5-3 The grain size parameter of different types of *Tamarix nabkhas* and interdune in Aibi

Lake						
不同部位	参数	平均粒径 Mz (Φ)	分选系数 σ (Φ)	偏度 Ski (Φ)	峰度 Kg (Φ)	中值 (Φ)
迎风坡基部	最大值	5.07	0.29	-0.19	1.85	4.69
	最小值	3.26	-0.09	-0.48	0.86	3.20
	平均值	4.1700	0.0900	-0.3500	1.3000	3.7800
	标准差	0.6271	0.1460	0.0906	0.3682	0.4854
迎风坡中部	最大值	5.89	0.37	-0.02	2.04	5.90
	最小值	3.29	-0.14	-0.57	0.85	3.25
	平均值	4.1000	0.1400	-0.3600	1.5300	3.8000
	标准差	0.6747	0.1716	0.1752	0.3582	0.6918
坡顶	最大值	4.82	0.50	-0.30	2.33	4.30
	最小值	3.37	-0.08	-0.56	0.86	3.20
	平均值	3.8500	0.2100	-0.4000	1.6700	3.5600
	标准差	0.5341	0.1835	0.0856	0.4476	0.3323
背风坡中部	最大值	4.87	0.39	-0.39	2.10	3.98
	最小值	3.47	-0.12	-0.58	0.85	3.34
	平均值	4.2200	0.0600	-0.5200	1.4000	3.6300
	标准差	0.4143	0.1563	0.0573	0.4589	0.2083
背风坡基部	最大值	4.72	0.33	-0.30	1.93	4.06
	最小值	3.23	-0.12	-0.61	0.87	3.13
	平均值	4.0500	0.0800	-0.5100	1.5400	3.5100
	标准差	0.3870	0.1204	0.0878	0.3438	0.2213
丘间地	最大值	5.80	0.34	-0.09	1.91	5.61
	最小值	3.27	-0.12	-0.52	0.81	3.19
	平均值	4.3000	0.0800	-0.3600	1.2900	3.9400
	标准差	0.6328	0.1217	0.1087	0.3314	0.5953

5.2.3 偏度(S_{ki})

偏度可判别分布的对称性，并表明平均值与中位数的相对位置。其变化规律反映了怪柳沙堆表面风沙流积蚀强度空间变化规律。怪柳沙堆风沙沉积的偏度在-0.02—-0.61之间, 总体平均值-0.39，属于极负偏，河流入口处怪柳沙堆的偏度平均值-0.43, 属于极负偏，玛依力山洪冲积扇扇缘怪柳沙堆偏度均值为0.10，属于正偏。在负偏组分中中负偏占18%, 极负偏占82%, 说明艾比湖周边怪柳灌丛沙堆以细组分为主。沙堆迎风坡基部、坡中、坡顶、背风坡中部、基部依次是-0.35、-0.36、-0.40、-0.52、-0.36，沙堆背风坡比迎风坡更趋向于负偏，这与沙堆背风坡气流涡动较强、风速较小是一致的。偏度按照迎风坡基

部、迎风坡中部、顶部、背风坡中部依次变大,最大值出现在背风坡中部,最小值出现在迎风基部。偏度的这种变化反映了沙堆表面迎风坡的风力作用从坡脚到坡顶逐渐加强,背风坡沉积作用从坡顶到坡中、坡底逐渐变弱。

丘间地砂的偏度在 -0.09 — -0.52 之间,平均值 -0.36 ,属极负偏。其中极负偏占75%,负偏占21%,正偏占4%。与沙堆沙大体一样,都是极负偏,即以细颗粒占主要优势。

5.2.4 峰度(Kg)

峰态是度量粒度分布的中部和尾部展开之比,是发现双峰曲线的重要线索。怪柳沙堆沙峰度在 0.85 — 2.33 之间,总体平均值 1.44 ,属于窄峰态。河流入口处怪柳沙堆的峰度平均值 1.49 ,属于窄峰态,玛依力山洪冲积扇扇缘怪柳沙堆峰度均值为 0.85 ,属于宽峰态。丘间地砂的峰度在 0.81 — 1.91 之间,平均峰度值为 1.29 ,属于窄峰态,这说明风力作用过程较久,沙物质分选极好,因而峰态较为尖陡。其中沙堆沙宽峰态占12%,中峰态占22%,尖窄峰态占64%;丘间地砂宽峰态占8%,中峰态占33%,尖窄峰态占58%。沙堆砂从迎风坡基部经坡中到坡顶峰度逐渐增大,而后经背风坡中部至基部依次变小,迎风坡的沙物质峰度大于背风坡,峰度最大值在沙堆顶部,反映了典型的风力作用特征。

5.2.5 艾比湖周边怪柳沙堆粒度特征参数之间关系

(1)平均粒径与分选性:平均粒径与分选性二者之间由图 5-3a 可见关系很集中,呈现高度负相关, $M_z=4.42-2.91\sigma$, $r=-0.869$ 。表明粒径越大,分选越好,反之,分选越差。从而进一步暗示沙堆表面的局部气流波动会对粒径和分选有所影响。

(2)平均粒径与偏度:平均粒径与偏度关系相对较分散,无明显函数关系(图 5-3b)。表明沙粒的粒径与偏度之间不相关。

(3)平均粒径与峰度:平均粒径与峰度散点比较集中(图 5-3c),呈现高度负相关,相关直线方程 $M_z=5.72-1.10\sigma$, $r=-0.830$ 。表明粒径越大,峰态愈趋向平缓。

(4)分选与偏度:分选性与偏度散点不是很集中(图 5-3d),呈现不显著正相关。相关直线方程: $\sigma=0.32+0.47S_{ki}$, $r=0.369$ 。显示出分选越好,沙粒越趋向细粒级。

(5)分选与峰度:分选与峰度呈现高度正相关(图 5-3e),样点分布较集中,相关直线方程为 $\sigma=-0.41+0.35K_g$, $r=0.889$ 。表明分选越好,峰态越趋近平缓。

(6)偏度与峰度:偏度与峰度再散点图上可看出散点非常分散,无函数关系(图 6-3f)。

5.3 区域风动力与粒度特征关系

研究区灌丛沙堆粒度特征及其空间差异与区域风动力条件变化有密切关系。研究区地处北半球中纬度西风带，因此全年盛行偏西风，但实际风向受到下垫面起伏地形的干扰而发生变化。依据研究区各气象站 2001-2006 年风向观测数据分析（图 5-4），本区冬季盛行西北风和偏北风，夏季盛行东南风，但西北风远远强于东南风，合成输沙方向指向东南，区域输沙势由艾比湖西北部的阿拉山口，向艾比湖东南和东部地区逐渐减弱。因此，本区怪柳沙堆长轴走向大部分为西北-东南走向，与当地合成输沙方向一致。同时，朝向西北的迎风坡坡度较缓，而朝向东南的背风坡坡度较陡。从粒度特征的空间分布特点看，在西北-东南风力的长期作用下，分布在上风区阿拉山口怪柳沙堆砂平均粒径较粗，在艾比湖东侧下风区怪柳沙堆砂的平均粒径较细。同时，艾比湖周边所有怪柳沙堆西北迎风坡平均粒径较粗，而东南背风坡砂物质的平均粒径较细。怪柳沙堆表层粒度分布则遵循一般沙堆表层粒度分布特点，各个沙堆的西北迎风坡总体上较粗、分选性较差、偏度较小、峰度值也较大，各沙堆东南背风坡粒度组成总体上较细、分选性较好、偏度较大、峰度值也较小。当然，具体的怪柳沙堆及其丘间地粒度组成还受到湖泊退缩过程、怪柳群落演替规律以及砂物质补给来源的影响。

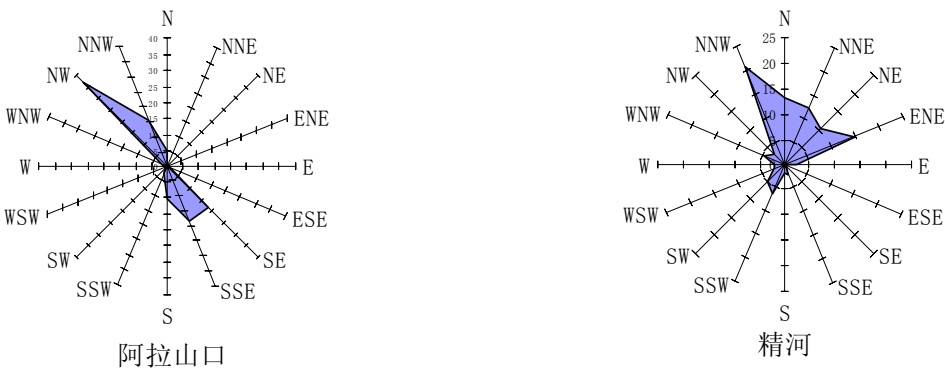


图 5-4 研究区 2000-2006 年最大风向频次玫瑰图

Fig.5-4 The rose diagram frequency of wind direction from 2000 to 2006 in study area

5.4 小结

(1) 艾比湖周边怪柳沙堆表层沉积物主要是以极细砂（占34.60%）为主，其次是细砂（占21.90%），再次是粗粉砂（占13.21%），极粗砂含量最少（占0.08%）。其余各粒级组分含量由大到小依次为：细粉砂、粗粘土、极细粉砂、中粉砂、中砂、细粘土、粗砂。怪柳灌丛与风沙流在不同地貌部位相互作用的差异，导致了沙堆表层粒度组分的空间分异。丘间地沉积物也是以极细砂为主

(占28.27%), 极粗砂含量最少 (占0.31%)。

(2) 艾比湖周边怪柳沙堆总体的平均粒径为 4.19Φ 。怪柳沙堆平均分选系数 0.10, 属于分选极好。沙堆砂偏度平均值-0.39, 属于极负偏, 表明细颗粒占优势。怪柳沙堆砂平均峰度值为 1.44, 属于窄峰态, 说明风力作用过程较久, 风成砂分选极好, 因而峰态较为尖陡。

(3) 艾比湖周边怪柳沙堆砂的平均粒径与分选性、平均粒径与峰度都呈现高度负相关, 表明粒径越大, 分选越好, 峰态愈趋向平缓。分选与峰度呈现高度正相关, 表明分选越好, 峰态越趋近平缓。分选与偏度呈现不显著正相关, 表明分选越好, 沙粒越趋向细粒级。艾比湖周边怪柳沙堆砂平均粒径与偏度、偏度与峰度都无相关性, 无明显函数关系。

(4) 区域风动力条件是影响灌丛沙堆粒度特征及其空间变异的主要因素之一。在西北-东南风力的长期作用下, 分布在上风区阿拉山口怪柳沙堆砂平均粒径较粗, 在艾比湖东侧下风区怪柳沙堆砂的平均粒径较细。同时, 艾比湖周边所有怪柳沙堆西北迎风坡平均粒径较粗, 而东南背风坡砂物质的平均粒径较细。

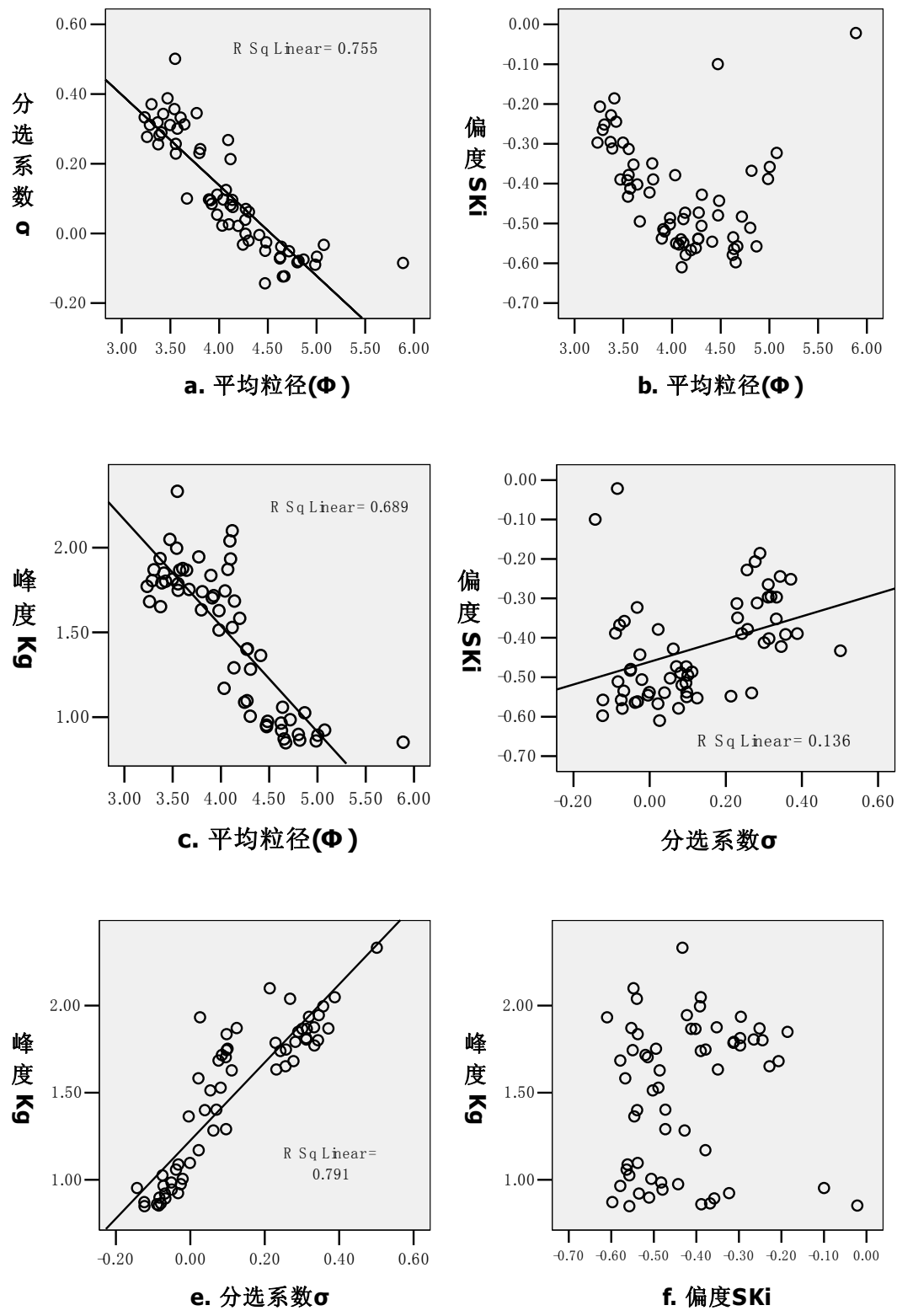


图5-3 粒度参数关系散点图

Fig.5-3 The scattering maps of the relationship between grain size and parameter

6 艾比湖周边柽柳沙堆土壤特征及植被特征

在灌丛沙堆发育中，土壤作为灌丛根系生长发育的基质，要不断地供给植物正常生长所需的营养物质、能量和水分，要不断提供植物生存空间，同时，植物的生长状况、植物死亡后的凋落物状况和植物根系等的分布特征影响着土壤的性质。因此了解柽柳沙堆的土壤理化特征更利于柽柳沙堆形成机制的研究。

6.1 艾比湖周边柽柳沙堆土壤理化特征

6.1.1 柽柳沙堆土壤 pH 值、总盐量及有机质特征

依据土壤特性要素的统计分析表明（表 6-1），柽柳沙堆 pH 值在 8.16—8.80 之间，均值为 8.455，丘间地 pH 值在 8.03—8.89 之间，均值为 8.450，通过正态检验发现 pH 值符合正态分布，柽柳沙堆与丘间地 pH 的变异系数分别为 2.14%，2.45%，属于弱变异性（ $CV < 10\%$ 为弱变异性， $CV = 10\% - 100\%$ 为中等变异性， $CV > 100\%$ 为强变异性），可见研究区 pH 值相对稳定，按 pH 值 < 8.5 为盐土， $pH > 8.5$ 为碱土^[47]，可以认为研究区柽柳沙堆土壤大部分为盐土，柽柳冠下土壤 PH 值略高于丘间地（表 6-1），这可能与柽柳凋落物呈碱性有关，因为柽柳同化枝盐腺与空气中 CO_3^{2-} 结合会形成 HCO_3^{-} ^[48]。

表 6-1 柽柳沙堆与丘间地土壤特性统计特征值

Table 6-1 The statistics feature table of soil properties in *tamarix nabkhas* and interdune

不同部位	特性要素	最小 Min	最大 Max	平均值 Mean	标准差 SD
柽柳沙堆	PH	8.16	8.80	8.4550	0.1810
	总盐量 (g/kg)	2.21	48.02	7.9570	7.2901
	有机质 (g/kg)	1.75	24.76	6.0276	4.8560
丘间地	PH	8.03	8.89	8.4496	0.2073
	总盐量 (g/kg)	2.79	23.90	7.1569	4.8373
	有机质 (g/kg)	2.70	11.79	5.7254	2.3518

研究区内柽柳沙堆总盐量在 2.21 g/kg - 48.2 g/kg 之间，均值为 7.96 g/kg；丘间地总盐量在 2.79 g/kg - 23.90 g/kg 之间，均值为 7.16 g/kg。根据新疆盐碱化分级标准^[49]，研究区柽柳沙堆所在区域的土壤非盐渍化、轻度、中度、重度盐渍化以及盐土均有，但是主要以轻度盐渍化为主（非盐渍化土壤 < 3 g/kg；轻度盐渍化土壤 3 g/kg - 10 g/kg；中度盐渍化土壤 10 g/kg - 20 g/kg；重度盐渍化土 20 g/kg - 30 g/kg；

其余土壤均为盐化土壤($>30\text{g/kg}$), 这说明了柽柳对土壤盐碱度的要求不高, 其生态幅度较宽, 生态适应性较强。有研究表明柽柳可生存于多种生境的原因是柽柳根部对离子的吸收具很低的选择性, 柽柳属(*Tamarix* L.) 植物都具有泌盐腺, 分布在鳞片状叶及当年生绿色营养枝上, 通过泌盐腺柽柳叶片对吸收的离子组分可进行调节并将一定的元素排出体外, 来调节盐分平衡^[50]。一般而言, 干旱区土壤表层的盐分累积来源主要是地下水蒸发聚盐。但柽柳的遮荫效应会降低灌丛下土壤表面的蒸发强度, 通常情况下, 灌丛下土壤含盐量应当小于丘间地的含盐量。而本研究中可以看到(表6-1, 图6-1), 柽柳沙堆的总盐量大于丘间地, 形成了明显的“盐岛”, 这可能与柽柳的泌盐作用及叶片中较高的含盐量^[51, 52], 即生物积盐有关。

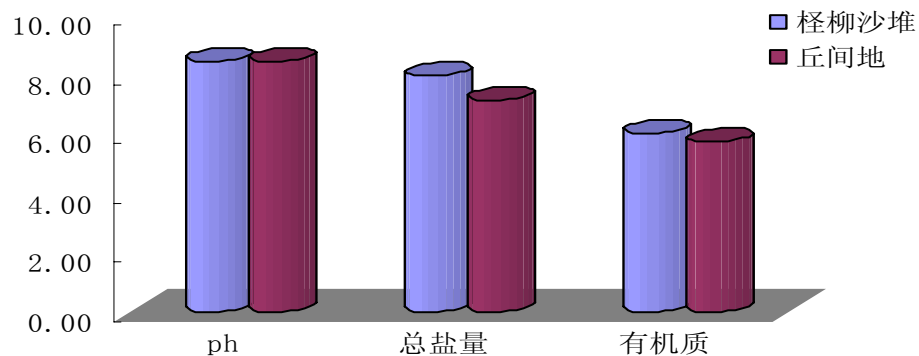


图 6-1 柽柳沙堆与丘间地土壤特性要素变化

Fig. 6-1 The different soil properties of *tamarix* nabkhas and interdune

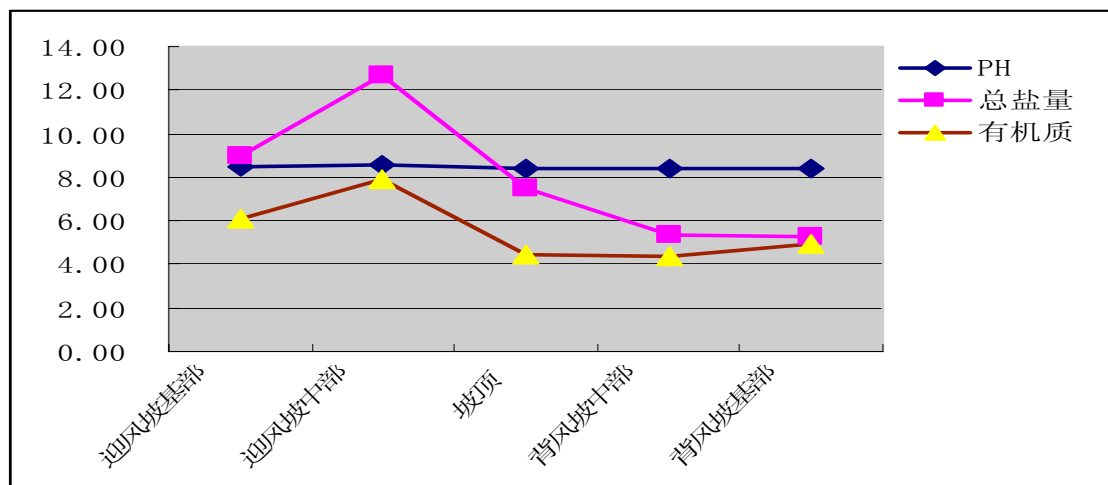


图 6-2 艾比湖周边柽柳沙堆不同部位表层土壤理化特征变化

Fig 6-2 The statistics feature of soil properties in different types of *Tamarix* nabkhas in Aibi Lake

柽柳沙堆的有机质平均为 6.03 g/kg，最大值为 24.76 g/kg，丘间地为 5.73 g/kg，最大值仅为 11.79g/kg，沙堆有机质大于丘间地有机质含量，可能主要有两个原因：其一是丘间地表层土壤肥力较高的物质被侵蚀搬运到沙堆，形成相对的“沃岛”，其二是柽柳灌丛枯枝落叶在沙堆中的腐烂、分解增加了土壤肥力。凋落物是土壤有机质最主要的来源^[2]，柽柳冠下地表凋落物高于灌丛间地数倍，所以其有机质也高于丘间地，形成相对的“沃岛”。

由图 6—1 可看到，柽柳沙堆与丘间地两者 pH 近似，说明柽柳在此区域并没有大幅度改变土壤的 pH 值，柽柳能够在这样的土壤条件下扎根生长，这也从另一方面反映出，柽柳根对养分的吸收主要是集中在沙堆上。相对丘间地，柽柳沙堆的有机质与总盐量的富集率均为 1.1，富集率大于 1 表明其二者均在灌丛沙堆上富集。盐渍化程度与 pH 值不存在明显的相关性，这可能是柽柳沙堆区域总盐分的组成主要是 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等组成的中性盐为主，而 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 含量很少的原因。

表 6-2 艾比湖周边柽柳沙堆不同部位土壤特性统计特征值

Table 6-2 The statistics feature of soil properties in different types of *Tamarix nabkhas* in Aibi

Lake					
不同部位	参数	最大值	最小值	平均值	标准差
迎风坡基部	PH	8.78	8.16	8.5117	0.2193
	总盐量 (g/kg)	30.5	3.3	8.9366	7.3471
	有机质 (g/kg)	17.86	2.57	6.0837	3.9451
迎风坡中部	PH	8.8	8.3	8.5667	0.1467
	总盐量 (g/kg)	48.02	4.56	12.6954	12.2319
	有机质 (g/kg)	24.76	2.84	7.8713	6.8315
坡顶	PH	8.72	8.27	8.4375	0.1348
	总盐量 (g/kg)	17.83	3.05	7.5223	4.1154
	有机质 (g/kg)	8.03	2.14	4.4844	1.7786
背风坡中部	PH	8.67	8.25	8.3792	0.1267
	总盐量 (g/kg)	8.11	2.45	5.3514	1.7245
	有机质 (g/kg)	5.87	1.75	4.3932	1.2903
背风坡基部	PH	8.67	8.17	8.38	0.1807
	总盐量 (g/kg)	10.79	2.21	5.2793	2.1573
	有机质 (g/kg)	6.96	3.17	4.9314	1.2863

怪柳沙堆的不同部位,其 pH、总盐量以及有机质也表现出差异(表 6-2,图 6-2),pH 值在迎风坡中部为最大值 8.57,最小值在背风坡为 8.38,总体变化不大;总盐量最大值在迎风坡中部为 12.70 g/kg,最小值在背风坡基部 5.35 g/kg;有机质的最大值在迎风坡中部为 7.87 g/kg,最小值在背风坡基部 4.93 g/kg。PH 值在沙堆不同部位变化非常微小,总盐量及有机质变化比较大,它们的最大值均在迎风坡中部,而且沿着迎风坡中部、坡顶、背风坡中部、背风坡基部依次降低,并且有机质与总盐量的变化趋势相似,这是由于怪柳沙堆上的灌丛冠层主要在迎风坡中部,产生这种现象其一是因为迎风坡气流上升,降雨较多,湿度较好,植被生长好,背风坡气流下降,干旱少雨,所以植物在迎风坡生长较好;其二是由于植物自身的生长,由于受到单个或多个内外界因素的影响,产生偏冠和根系分布不均,导致生长季单侧形成层破坏和死亡,产生树盘偏心生长现象^[12]。偏心生长的主要原因是怪柳灌丛发育到一定阶段,所有枝条都从灌丛中间逐年向外扩展,同时枝干受到冠层重力压迫,向四周的倾斜度逐年加大,以致有些较大灌丛的外围老枝呈水平状态向外伸展,造成树盘背地向偏心生长,这也就同时造成了怪柳冠层在沙堆上的偏心位置。其三坡顶植物被人为破坏。由此灌丛的泌盐作用及枯枝落叶凋落物等都在迎风坡集中,并向整个沙堆扩散,最终表现为有机质及盐分在灌丛沙堆的集中。

5.1.2 怪柳沙堆与丘间地土壤盐分离子特征

CO_3^{2-} 离子在怪柳沙堆与丘间地中含量均值都为 0,变化在 0.06 g/kg—0.00 g/kg 之间,说明其含量极小, CO_3^{2-} 的多少是判断土壤碱度的标志^[53],而 PH 均值小于 8.5,也正说明了这一点。 HCO_3^- 在沙堆与丘间地中含量均值分别为 0.15 g/kg、0.14 g/kg,含量都不高;在怪柳沙堆中盐分离子含量由高到底依次是 $\text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ + \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$,由表 6-3 可以看出,丘间地盐分离子含量变化与沙堆中的盐分离子含量变化高度一致。怪柳沙堆中 SO_4^{2-} 最高,这说明研究区怪柳沙堆土壤以硫酸盐类为主,又因其 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量高于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,表明怪柳沙堆土壤表层主要是以硫酸钠盐和硫酸钾盐为主。怪柳沙堆 CO_3^{2-} 的富集率是 0.96, HCO_3^- 的富集率是 1.09, Cl^- 的富集率是 0.87, SO_4^{2-} 的富集率是 1.16, Ca^{2+} 的富集率是 1.20, Mg^{2+} 的富集率是 1.21, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 的富集率是 1.05,由表 6-3 可以看出, CO_3^{2-} 、 Cl^- 的富集率小于 1 的,表明它们是从“岛内”向“岛外”扩散。对各盐分离子富集率的不同可能是因为怪柳灌丛对各离子吸收作用的差异造成的,有研究表明怪柳体内较高的 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 浓度很可能是灌丛下富集较高含量 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 的主要原因^[54]。

表 6-3 怪柳沙堆与丘间地土壤盐分指标差异

Table 6-3 The difference of soil salinity guide line in different positions of haloxylon ammodendron

不同 部位	参数	CO ₃ ²⁻ (g/kg)	HCO ₃ ⁻ (g/kg)	Cl ⁻ (g/kg)	SO ₄ ²⁻ (g/kg)	Ca ²⁺ (g/kg)	Mg ²⁺ (g/kg)	K ⁺ +Na ⁺ (g/kg)	总盐 (g/kg)
怪柳 沙堆	最大 值	0.05	0.61	4.14	30.96	2.54	0.83	14.42	48.02
	最小 值	0.00	0.05	0.09	1.20	0.13	0.00	0.26	2.21
	平均 值	0.00	0.15	0.55	4.56	0.82	0.06	1.81	7.96
	标准 差	0.0094	0.0829	0.6807	4.6784	0.5916	0.1184	2.2244	7.2901
丘间 地	最大 值	0.06	0.31	5.73	15.36	2.24	0.20	6.64	23.90
	最小 值	0.00	0.03	0.05	1.44	0.12	0.00	0.47	2.79
	平均 值	0.00	0.14	0.63	3.93	0.68	0.05	1.72	7.16
	标准 差	0.0122	0.0575	1.1025	2.7499	0.5357	0.0559	1.4159	4.8373

6.2 艾比湖周边怪柳沙堆植被特征

研究区怪柳沙堆上植物密度的变化由大到小依次为：迎风坡>坡顶>背风坡。说明不同的地形条件影响植株的分布。河流入口处怪柳沙堆上的伴生植物与丘间地植被种类比较少，总盖度比较小，洪积扇缘怪柳沙堆伴生植物主要是梭梭，丘间地几乎为裸地。

6.2.1 怪柳沙堆伴生植物

怪柳沙堆上伴生植物主要有猪毛菜、琵琶柴、梭梭 3 种，分属 2 科，其中猪毛菜为藜科一年生草本，琵琶柴与梭梭均为灌木，分属于怪柳科与藜科，植物主要生长在迎风坡，背风坡非常少，其中琵琶柴伴生较多, 占 50.94 %,猪毛菜占 34.55 %,梭梭占 14.54 %。

6.2.2 丘间地植被

怪柳沙堆丘间地植被盖度较低，所包含的物种主要由 5 个，属于 4 科，丘间地的植被主要有琵琶柴、梭梭、白刺、猪毛菜、麻黄，其中猪毛菜较多，占

62%，植株高度在 0.15m 左右，冠幅较小，所以其盖度较低。其次是琵琶柴，占到 21%，株高平均为 0.60m,再次为梭梭，占 11%，平均株高为 1.55m，白刺与麻黄所占比例较少。

6.3 小结

研究区域怪柳沙堆 PH 均值为 8.455，丘间地 pH 均值为 8.450，pH 的变异系数分别为 2.14%，2.45%，属于弱变异性，可见研究区 pH 值相对稳定。研究区怪柳沙堆所在区域的土壤有非盐渍化、轻度、中度、重度盐渍化以及盐土均有，但是主要以轻度盐渍化为主，这说明了怪柳对土壤盐碱度的要求不高，其生态幅度较宽，生态适应性较强。怪柳的泌盐作用及叶片中较高的含盐量可导致盐分在怪柳沙堆上富集，即“盐岛”效应。同时怪柳灌丛枯枝落叶在沙堆中的腐烂、分解增加了土壤肥力，使有机质在沙堆上富集，引起“沃岛”效应。

对怪柳沙堆上盐分和有机质的富集效应而言，生物作用的主要表现为怪柳根系将养分、盐分吸收到体内、运输到地上部，再以凋落物的形式聚集于地表的过程。Arndt 等(2004)以及 Gries 等(2004)在塔克拉玛干沙漠南部的研究表明，怪柳所利用的水分和养分主要源于地下水，而根系在其中起关键性的作用(Arndt et al, 2004)。并且有研究认为“盐岛”形成的主要动力是多年生盐生植物的根系^[52]。因此可以认为本研究中土壤盐分、有机质在怪柳沙堆上的富集是怪柳的根际效应引起的生物小循环起了决定性作用，同时根系引起的生物积盐作用是怪柳“盐岛”形成的主要驱动力。怪柳沙堆伴生植物以琵琶柴为主，盖度较小，主要生长在迎风坡，背风坡几乎无伴生植物，丘间地植被种类少，盖度低，主要是因为怪柳造成了小范围的盐分升高，由于生物积盐一般在表层聚集，干旱区降雨少，盐分很难被冲洗至土壤下层，所以怪柳的出现对于其它物种的生长造成可危害及胁迫，降低了物种多样性。

7 讨论与展望

7.1 讨论

7.1.1 艾比湖周边怪柳沙堆“沃岛”及“盐岛”效应

研究区怪柳沙堆有机质和盐分含量高于丘间地,表明怪柳灌丛的存在会导致土壤有机质、盐分在冠下的富集,即“沃岛”和“盐岛”效应。怪柳沙堆盐分与有机质的相对富集是怪柳灌丛对沙尘物质的截获和对沙丘土壤的反馈等双重作用的形成的。“沃岛”和“盐岛”的形成是植物根系吸收盐分,运输到地上,再随枯枝落叶回到土壤中的结果^[47]。一般而言,干旱区土壤表层的盐分累积来源主要是地下水蒸发带到地表的盐分,怪柳灌丛的遮荫效应使沙堆土壤表面的蒸发强度变小,因此灌丛下土壤聚盐作用也应该小于丘间地的聚盐作用。然而本研究却观察到:灌丛下形成了明显的“盐岛”,这是由于怪柳根系的生物积盐导致盐分聚集。同时“盐岛”的存在也会造成怪柳本身更新的困难,因为只有在水聚集的低洼处怪柳种子才有可能萌发和建成(黄培佑, 2002)。怪柳的出现,会造成所在地区土壤盐分出现增加的趋势,这对生长在怪柳周围的植物产生了毒害作用,使之不能在高盐环境中生长,从而降低了当地的物种多样性(Di Tomas, 1998),怪柳沙堆上的伴生物种少、丘间地植被种类少、盖度小也表明了这一点。同时由于气候变化以及人为影响,使得艾比湖流域生态用水减少,而抑制了怪柳的更新,在这种情况下“盐岛”的存在更是抑制或排斥了其它不耐盐的物种的生长,从这一点来讲,“盐岛”的存在不利于艾比湖周边植被的恢复与重建。

在荒漠化的不同阶段上“沃岛”的指示意义不同。在草甸或草地生态系统退化为灌丛生态系统时,“沃岛”效应的加强指示了这一变化;而在灌丛生态系统继续退化为沙漠或半沙漠时,“沃岛”效应的削弱则反映了环境的退化。

7.1.2 区域内怪柳沙堆对环境的指示意义

怪柳沙堆最初发育于湿地环境,怪柳的生物积盐作用和泌盐作用增加了土壤的盐分,而怪柳的高耗水性又降低了地下水位,这抑制了其它物种尤其是浅根系植物的生长而降低了群落的物种多样性,促进了草甸向灌丛的退化。它的形成过程实质上很可能是一个环境退化的过程,引起这种退化的原因除了诸如气候变化等自然因素外,人类的活动如放牧等干扰也是一个重要的驱动力。许多研究表明怪柳沙堆仅仅是土地退化过程中一个短暂的现象,并且是气候更干和地表景观更加沙漠化的征兆,但是在灌丛地退化为沙漠的过程中,全球气候

变暖的大背景下, 艾比湖湖面的不断退缩, 以及其所处的地理位置提供了沙堆发育的三大要素: 风力、植被以及沙源, 此时怪柳沙堆的存在起到了屏蔽风沙、保护绿洲的作用。而它的负面作用仍然来自于它的生物积盐和泌盐作用。因为风沙的作用会将盐生植物带到地表的盐分转移至其它地区。

怪柳沙堆在判别土地沙漠化程度、建立土地沙漠化评价指标体系方面都可以发挥重要作用。但是目前还不能定量评价沙漠化发展程度, 需要结合此区域其它环境因素去做判别。

7.1.3 区域内怪柳沙堆的演化过程

多数学者认为灌丛沙堆是在区域风力, 沙子供应量、植被三个因素的影响下发生发展的。这三个因素的相互作用规律是区域自然地理环境的综合体现^[55]。穆桂金指出灌丛沙堆发育具有两个基本条件, 一是生长良好的灌丛, 二是风沙堆积。灌丛沙堆的稳定增长是植被生长速度与风沙堆积速度处在某种动态平衡状态^[9]。

艾比湖处于北疆两大气流入口之处——阿拉山口, 该区域年均大风(大于17m/s)日数多达164 d, 年均有8级以上大风241 h, 瞬间最大风速达55 m/s, 年平均风速6.0m/s。特殊的地理位置, 为灌丛沙堆的发育提供了必要条件之一: 风力。风做为沙堆发育的动力因素控制着沙堆的发育程度、时间及沙堆排列格局^[7]。

沙源的丰富程度对灌丛沙堆的形成也具有重要的影响, 艾比湖具有丰富的沙源: 一是在第四纪以来经自然因素搬运到湖滨的沙丘、沙垄, 分布在湖滨西南、东南铁路沿线; 二是湖面退缩引起的干涸湖底, 约1500 km², 三是植被严重破坏和衰败的裸露土及半裸露土; 四是大风主通道上裸露疏松农田^[40]。

怪柳灌丛自身有耐盐泌盐特性, 并且根系发达, 能够充分吸取土壤中的水分, 并且流沙掩埋了枝条后, 被沙埋的枝条会生长新的不定根, 所形成的不定根在沙丘内生长蔓延, 吸收水分, 萌生出的嫩枝迅速向高生长, 钻出沙面, 沙埋能够促进其生长。

艾比湖特殊的地理位置、由于自然与人为因素的共同作用导致的艾比湖湖面的不断退缩, 为怪柳沙堆的形成提供了区域风力及有效沙源。

灌丛沙堆的发展演化是处于气候变化及人类活动的共同控制之下, 依据Tenberg在突尼斯对灌丛沙堆的形态进行回归分析后, 提出了灌丛沙堆发育的三个阶段, 认为灌丛沙堆在初始成长阶段, 沙源供应充分, 高和长宽成正比例增长, 水平尺度与高度为高度相关; 灌丛沙堆发育到一定阶段由于沙源限制及其他原因或者丘间地-灌丛沙堆系统使流场紊流加强, 风速加大, 对沙堆的侵蚀加强, 灌丛沙堆高度处于侵蚀量与堆积量相等的稳定阶段, 长宽继续增加, 而沙堆高

度处于平衡；当沙源消失，或灌丛死亡，沙堆受到强烈侵蚀，高度逐渐变低，沙堆长度宽度继续增加，整个沙堆趋向逐渐消亡，因此在稳定和消退时期水平尺度与高度相关性不显著^[2]。艾比湖周边怪柳沙堆在河流入口处为稳定阶段，洪积扇扇缘的为衰退阶段。

沙漠化发展和逆转的过程都是人类活动与自然环境和资源相互影响和协调的结果，人为因素应当是沙漠化过程中最为活跃和主要的因素。艾比湖周边在河流入口处怪柳沙堆受到较多人为扰动，沙堆顶部部分植物被砍伐，造成沙堆失去了灌丛的庇护，一旦大面积灌丛由于人为或自然等因素出现衰败，那么沙堆会进入活化阶段，将会使区域生态环境进一步恶化，但是当艾比湖生态用水充足、人为扰动较小时，怪柳沙堆在短时期内会保持稳定，进一步遏制风沙流进程。

7.2 展望

（1）对于怪柳沙堆目前的研究仅在空间角度进行阐述，以期进一步将时空变化结合进行动态监测，更好的揭示其对于气候、水文等生态因子的响应，并进一步对区域环境演变提供科学依据。

（2）怪柳沙堆的土壤理化性质仅限于表层沉积，有待于进一步结合怪柳沙堆内部土壤进行研究，以期更深入探讨其土壤理化变化以及环境变迁。

（3）怪柳沙堆沉积纹层是荒漠地区一种高分辨率环境信息载体，其沉积纹层沙物质特征对沉积动力反映比较明确，但对植被条件、大气温度湿度变化的关系不易确定，要使怪柳沙堆沉积纹层成为高分辨率环境变化研究的一种新手段，在理论和实践上都有待进一步完善和提高。

（4）怪柳沙堆地貌学特征、土壤学特征、生态学特征在干旱区土地荒漠化监测与评价中的理论和实践问题尚待深入探讨，例如根据怪柳沙堆的正向和逆向演替来评价、土地沙漠化演化趋势，以及利用怪柳沙堆的各项特征来定量沙漠化发展趋势等。

结 论

通过对艾比湖周边怪柳沙堆的野外调查采样,结合沙堆沉积物粒度实验分析及土壤实验分析,本文初步获得了以下结论:

(1) 研究区怪柳沙堆形态特征参数有良好的相关性,沙堆长轴与短轴(相关系数为 0.835)、长轴与迎风坡长、背风坡长之间为高度相关(相关系数分别为 0.905、0.934);沙堆高度与长短轴显著相关(相关系数为 0.675、0.542);株高与沙堆高度高度相关(相关系数为 0.847),相对来说,株高对沙堆高度影响的更大。

(2) 怪柳灌丛与风沙流在不同地貌部位相互作用的差异,导致了沙堆表层粒度组分的空间分异。艾比湖周边怪柳沙堆表层沉积物主要是以极细砂与细砂为主,含量由大到小依次是:极细砂(34.60%)>细砂(21.90%)>粗粉砂(13.21%)>细粉砂(7.15)>粗粘土(6.07)>极细粉砂(5.68)>中粉砂(5.66)>中砂(3.50)>细粘土(1.51)>粗砂(0.65)>极粗砂(0.08%)。

(3) 艾比湖周边怪柳沙堆总体的平均粒径为 4.19Φ ,从其迎风坡基部经坡中至坡顶,粒径逐渐变大。沙堆分选极好,偏度属于极负偏,峰度属于窄峰态。怪柳沙堆砂的平均粒径与分选性、平均粒径与峰度都呈现高度负相关,分选与峰度呈现高度正相关,分选与偏度呈现不显著正相关,怪柳沙堆砂平均粒径与偏度、偏度与峰度都无相关性。

(4) 区域风动力条件是影响灌丛沙堆粒度特征及其空间变异的主要因素之一。在西北-东南风力的长期作用下,分布在上风区阿拉山口怪柳沙堆砂平均粒径较粗,在艾比湖东侧下风区怪柳沙堆砂的平均粒径较细。同时,艾比湖周边所有怪柳沙堆西北迎风坡平均粒径较粗,而东南背风坡砂物质的平均粒径较细。

(5) 研究区怪柳沙堆 PH 均值 8.46,总盐量均值为 7.96g/kg,有机质均值为 6.03g/kg,沙堆盐分与有机质都高于丘间地,在怪柳灌丛下富集,形成相对的“盐岛”与“沃岛”,怪柳沙堆土壤轻度盐渍化,土壤以硫酸盐类为主。

(6) 研究区怪柳沙堆主要分布在河流入口处及南北山麓洪积扇扇缘,是在盐化作用、脱盐作用与风沙作用交集形成的,河流入口处怪柳沙堆处于稳定阶段,在玛依力山洪积扇扇缘残余怪柳沙堆处于衰退阶段。

参考文献

- [1] 夏训诚, 赵元杰, 王富葆等. 罗布泊地区红柳沙包年层的环境意义探讨[J]. 科学通报, 2005, 50(19):2176~2177.
- [2] Tengberg A, Chen D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso [J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 181 ~ 192.
- [3] McKee E D. Sediment structure in dunes of the Namib desert, South West Africa[J]. Geological Society of America Special Paper, 1982, 188: 48 ~ 49.
- [4] Khalaf F I, Misak R, Al-Dousari A. Sedimentological and morphological characteristics of some nabkha deposits in the northern coastal plain of Kuwait, Arabia[M]. Journal of Arid Environment, 1995, 29: 267 ~ 292.
- [5] Hesp P. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics [J]. Geomorphology, 2002, 48: 245~268.
- [6] Hesp P, McLachlan A. Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes[J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44: 155 ~ 172.
- [7] 岳兴玲, 哈斯, 庄燕美等. 沙质草原灌丛沙堆研究综述[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 738~743.
- [8] 杜建会, 严平等. 甘肃民勤不同演化阶段白刺灌丛沙堆分布格局及特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8):1165~1170.
- [9] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义[J]. 干旱区研究, 1994, 11(1): 34~40.
- [10] 杜建会, 严平等. 民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 763~768.
- [11] Klemmedson J. O, Barth R. C. Distribution and balance of biomass and nutrients in desert shrub ecosystems[J]. US/IBP Desert Biome Research Memo. Logan: Utah State University Press. 1975, 75 (5) .
- [12] I. C. Burke, W. A. Reiners, D. L. Sturges, et al. Herbicide treatment effects on properties of mountain big sagebrush soils after fourteen years[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51: 1337 ~ 1343.
- [13] 刘发民, 金燕, 张小军. 梭梭林“肥岛”效应的初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13 (3): 86 ~ 88.
- [14] Schlesinger WH, Reynolds J F, Cunningham GL, et al. Biological feedbacks

- in global desertification[J]. *Science*, 1990, 247: 1043 ~ 1048.
- [15] 许文强, 罗格, 陈曦. 干旱区绿洲—荒漠过渡带灌丛土壤属性研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 583 ~ 586.
- [16] 崔向慧, 冯强, 王学全. 荒漠—绿洲过渡区灌丛沙包的蒸散特征及模拟[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 44 ~ 48.
- [17] 王升堂, 邹学勇, 张春来等. 民勤绿洲边缘带灌丛沙丘防风作用研究[J]. 地理科学, 2007, 27(1): 104 ~ 108.
- [18] 吕贻忠, 李保国, 崔燕. 不同植被群落下土壤有机质和速效磷的小尺度空间变异[J]. 中国农业科学, 2006, 39(8): 1581 ~ 1588.
- [19] 赵元杰, 夏训诚, 王富葆等. 罗布泊地区红柳沙包纹层沙粒度特征与环境指示意义[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 791 ~ 796.
- [20] 肖晨曦. 和田河流域灌丛沙堆粒度特征及成因的初步研究[D]. 新疆师范大学自然地理学专业硕士学位论文, 2007.
- [21] 梁继业, 王彦阁等. 鄂尔多斯高原雾冰藜在沙漠—河岸过渡带白刺沙堆上的空间分布特征[J]. 草业科学, 2008, 25(5): 42 ~ 47.
- [22] 于春堂. 鄂尔多斯高原北缘唐古特白刺灌丛沙包的空间格局研究[D]. 中国林业科学研究院博士论文, 2006.
- [23] 武胜利. 新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D]. 新疆师范大学自然地理学专业博士学位论文, 2007.
- [24] 尹传华, 冯固, 田长彦等. 塔克拉玛干沙漠北缘柽柳灌丛肥岛效应的变化规律及其生态学意义[J]. 北京林业大学学报, 30(1): 52 ~ 57.
- [25] 尹传华, 冯固, 田长彦等. 干旱区柽柳灌丛下土壤有机质、盐分的富集效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 263 ~ 265.
- [26] 周廷儒. 南疆塔里木河中游的变迁问题[A]. 见中国科学院新疆综合考察队、苏联科学院地理研究所编: 新疆维吾尔自治区的自然条件(论文集)[C]. 北京: 科学出版社, 1959, 60 ~ 74.
- [27] Muhtar Qong, Hiroki Takamura, Mijit Hudaberdi. Formation and internal structure of Tamarix cones in the Taklimakan Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 81 ~ 97.
- [28] He X.D, Y Gao and A Ren. Role of wind-sand disturbance in the formation and development of Tamarix taklamakanensis community[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(11): 1285 ~ 1290.
- [29] 李志忠, 武胜利等. 新疆和田河流域柽柳沙堆的生物地貌发育过程[J]. 地理学报, 2007, 65(5): 462 ~ 470.
- [30] 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): 1336 ~ 1338.
- [31] 夏训诚, 曹琼英, 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 ~ 569.
- [32] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 1 ~ 43.
- [33] 贾宝全, 慈龙骏, 高志海, 等. 绿洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨[J]. 干旱区研究, 2001, 18 (2): 19 ~ 24.
- [34] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义[J]. 干旱区研究, 1994, 11 (1): 34 ~ 40.
- [35] 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.
- [36] 周兴佳. 新疆绿洲的风沙灾害和减灾对策[J]. 新疆环境保护, 1994, 16 (4): 164 ~ 170. 护, 1994,
- [37] 咎梅. 基于 DEM 的艾比湖阶地研究[D], 新疆师范大学, 2007.
- [38] 金相灿等著. 中国湖泊环境第二册[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [39] 荆耀栋. 艾比湖干涸湖底沙尘暴形成与运行机制研究[D], 新疆师范大学, 2007.
- [40] 陈蜀江, 侯平, 李文华等, 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐, 新疆科技出版社, 2006.
- [41] 荆耀栋. 艾比湖干涸湖底沙尘暴形成与运行机制研究[D], 新疆师范大学, 2007.
- [42] Danin.A. Plants of desert dunes, In: Cloudsley-Thompson J L(ed). Adaptation of Desert Organisms. Heidelberg: Springer Verlag, 1996. 177.
- [43] 杨自辉, 高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11 (6): 923 ~ 926.
- [44] 王建民, 陈发虎. 石羊河古终端湖泊沉积物粒度特征与沉积环境初探[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35 (1): 194-198.
- [45] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 14-16.
- [46] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究[J]. 土保持研究, 1999, 6(4): 75-79.
- [47] 鲍士旦主编, 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社. 2000, P. 170-172, P. 165, P. 178 ~ 200.
- [48] Briggs J, Dickinson G K, Murphy I D, et al. Sustainable development and resources and their use in the Wadi Allaqi region of Egypt[J]. Applied Geography, 1993, 13(3): 259 ~ 284.

- [49] 文彩主编.新疆土壤[M].北京:科学出版社, 1996, 304-336, 363.
- [50] Waisel Y. Biology of Halophytes [M]. New York:: Academic Press, 1972.
- [51] Busch D E, Smith S D. Mechanisms associated with decline of woody species in riparian ecosystems of the southwestern U.S[J]. Ecology Monograph, 1995, 65(3): 347~370.
- [52] Bosabalidis A M. A morphological approach to the question of salt gland lifetime in leaves of *Tamarix aphylla* L., Israel [J]. Journal of Botany, 1992, 41(3): 115~121.
- [53] 于天仁, 王振权主编. 土壤分析化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 126, 301~304.
- [54] 尹传华. 塔克拉玛干沙漠北部怪柳灌丛肥岛、盐岛的特征及其与荒漠化过程的关系[D]. 中国农业大学博士学位论文, 2006.
- [55] 武胜利, 李志忠, 肖晨曦等. 灌丛沙堆的研究进展与意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (5): 734~738.

在读期间发表的论文

- [1] 李万娟, 李志忠等. 新疆艾比湖周边怪柳沙堆形态特征初步研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2008, (6):66-72.
- [2] 李志忠, 武胜利, 李万娟等. 最近 10 年来新疆风沙地貌研究进展[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2):295-303.
- [3] Li Zhizhong, Wu Shengli, Li Wanjuan, et al. Wind tunnel experiments of air flow patterns over nabkhas modeled after those from the Hotan River Basin, Xinjiang China (I):non-vegetated. Frontiers of Earth Science in China, 2008, 2(3):333-339.
- [4] Li Zhizhong, Wu Shengli, Li Wanjuan, et al. Wind tunnel experiments of air flow patterns over nabkhas modeled after those from the Hotan River Basin, Xinjiang China (II):vegetated. Frontiers of Earth Science in China, 2008, 2(3):340-345.

后 记

时光匆匆，转眼间三年的学习生活即将结束，兴奋的同时也由衷地不舍，在论文完成之际，我首先由衷的感谢我的导师李志忠教授，从论文的选题、开题、实验及论文的撰写和成稿，在每一个环节上李教授都认真、及时地给予了我许多的帮助和指导，提出了很多的宝贵意见和建议。导师活跃的科研思维、细致严谨的治学态度、忘我的不知疲惫的工作精神和诲人不倦的导师风范为我的人生树立了榜样，激励着我不断前进。

在论文的撰写过程中也得到了陈蜀江教授、武胜利副教授的帮助和支持，在此表示由衷的谢意！感谢中国科学院新疆生态地理研究所的穆桂金研究员，他为本文粒度实验的完成提供了很多帮助和指导。并且感谢我的专业课老师：焦黎教授、楚新正教授、王哲教授、王晓峰教授、海鹰教授，是他们给了我无价的知识，也感谢与我一起出野外观测采样的的师弟师妹，一起走过的日子是永恒美好的记忆。感谢同门师兄师弟刘金伟、凌志勇、王少朴、曹相东同学在土壤实验中的帮助，感谢郭晶师姐在制图方面的帮助，在此向他们表示最诚挚的谢意！

同时，我要感谢我的父母，感谢我的爱人，对他们说一声：你们辛苦了！是你们给予我世界上最无私的爱，才使我能够顺利完成我的学业,在这里向他们表示我最深的祝福！

最后，我要感谢我的学校——新疆师范大学，感谢您提供了这么好的环境，并让我有学业继续深造的机会，才使我在这里度过了一段美好难忘的时期，接受到终生受益无穷的教育，谢谢！

李万娟

2009年6月10日