石河子大学

硕士学位论文

不同植物类型下的沙面稳定性研究——以古尔班通古特沙漠为例

姓名：王光富

申请学位级别：硕士

专业：植物学

指导教师：马淼

20100601

摘要

古尔班通古特沙漠位于我国新疆北部准噶尔盆地腹地，是我国唯一在冬季存在稳定积雪的固定与半固定沙漠。但由于气候变化以及人类活动的干扰，古尔班通古特沙漠的流沙化加剧，沙尘暴发生呈上升趋势，对当地环境及人民生活造成极大影响。因此，对于沙漠植被保护，防止固定沙丘活化，成为目前关注的焦点。

本研究位于古尔班通古特沙漠南缘莫索湾地区，在 40km 的跨度上选取三个具有不同植被状况和环境差异的样地，对 3 个样地 42 个样方内的物种多度、盖度、株高进行测定,计算每个样方内物种的重要值。运用 TWINSPAN 和 DCA 排序结合的方法，对各样地的植物群落进行了分类。并运用 CCA 排序方法分析了物种分布与环境的关系。在各样地之间对植物丰富度、植物多样性，植物均匀度、植被盖度、土壤含水率、沙粒径、及地形因子等影响沙面稳定的各项相关因子进行分析对比，并运用蚀积量和输沙量两项指标对个样地沙面稳定性进行了评价。从多个方面进一步探讨植被类型与沙面稳定性的关系。研究得到以下结论：

一、三个样地的群落主要分为五种类型：

虫实—异翅独草群丛 、长翅猪毛菜群丛、白梭梭—白皮沙拐枣群丛、沙蓬—角果藜群丛和沙漠绢蒿—心叶驼绒藜 —补血草群丛。

DCA 分析表明：样地样方存在不同程度的聚集，说明样方之间存在明显的环境差异。由于物种对环境适应能力不同，各群丛在三个样地存在明显的分布差异，虫实－异翅独尾草群丛主要分布于 150 团和 147 团样地。长翅猪毛菜群丛主要分布于 149 团样地。白梭梭－白皮沙拐枣群分布于 150 团和 149 团样地。沙蓬－角果藜群丛和沙漠绢蒿－心叶驼绒藜 －补血草群丛主要分布于 147 团样地。

二、CCA 分析结果表明，可溶性盐含量对植被分布影响不显著。白梭梭－白皮沙拐枣群丛分布与输沙量、蚀积量相关，表明该群丛对极端环境适应能力较强，是植被演替的先锋物种。角果藜－异翅独草群丛的分布与有机质和土壤含水量相关，该类型对环境因子的依赖较强。长翅猪毛菜群丛的分布与 Ca^{2+}离子相关，与有机质和土壤含水量呈负相关，该群丛的耐旱能力耐贫瘠能力较强，但对风蚀的忍耐能力相对较弱。沙蓬—角果藜群丛和沙漠绢蒿－心叶驼绒藜 －补血草群丛的分布与坡度、坡位相关，与输沙量、蚀积量呈负相关，说明该群丛属于环境依赖型，是演替中期的物种。总的来看，150 团和 149 团样地群落物种丰富度、多样性、均匀性均呈不同程度的下降趋势，而生态优势度呈增大趋势，群落物种数减少，优势种更加突出，说明沙地活化在加剧。

三、物种丰富度和多样性并不能直接对沙面的稳定性造成影响，必须对盖度和均匀度做出贡献才有意义。较小的粒径组成能提高土壤的持水能力，而较大的粒径组成能增加风蚀对沙面的启动风速，因此，粒径对沙面稳定是积极的还是消极的，必须与样地环境相结合。而土壤含水量一方面决定了物种的分布格局，另一方面，增加了土壤的粘连性，减小风蚀对沙面的影响。坡度受限于沙丘高度，坡度和高度一方面通过影响水分分布，从而影响沙面植被的分布格局。另一方面，坡度和高度决定不同坡位风沙活动差异，影响粒径的垂直分异。沙丘高度还与风蚀强度密切相关。

四、通过对各样地及影响沙面稳定的各因子的综合分析，147 团样地的沙面最稳定，150 团次之，149 团最差。通过沙面的输沙量和蚀积量的标准来看，也得到了相同的结论。

关键词：沙漠；植被；DCA； 分类排序；多样性; 稳定性

ABSTRACT

Gurbantunggut Desert locates north of Xinjiang zuengeer basin interior region, it is the only one desert settled and half settled that existence steady snow cover in winter. But the activation and dust devil has pricked up in this desert coursed by change of climate and people's disturbance, which has maximum impact to the environment and people's life. So the protection of desert's vegetation,prevent the activation of desert has been focus. The study chose three sites which have different vegetation and environment difference in 40km span in Mosuowan area. Abundance,height,coverage,calculated important value of every sample in three sites. The vegetation every sites was been classified by using TWINSPAN and DCA. For study the relationship between vegetation and environment, the ordination has been study by using CCA ordination.The factors which relate the stability of sand surface as abundance, diversity, coverage, soil moisture, sand diameter, and landform has been contrasted and analyzed.Use sand erosion and sand importation to valuate the stability. The study got thereinafter conclusion：

1. The vegetation has been classified five types:

1)Ass. *Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius*

2)Ass.Salsola paulsenii

3)Ass.Calligonum leucocladum —Haloxylon persicum

4) Agriophylum squarrosum —Eremurus anisopterus

5)Ass. Seriphidium santolium —Ceratoides ewersmanniana-Limonium mill

The environmental difference among samples is obvious for samples in different sites has different conglomeration from DCA ordination. Distributions of Groups in three sites is obvious, because that the accommodation of species was different. Ass. *Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius* mostly distribute in sites 150 tuan and 147 tuan. *Ass.Salsola paulsenii* mostly distribute in site 149 tuan. *Ass.Calligonum leucocladum —Haloxylon persicum* mostly distribute in sites 150 tuan and 149 tuan. *Agriophylum squarrosum —Eremurus anisopterus* and *Ass. Seriphidium santolium — Ceratoides ewersmanniana-Limonium mill* mostly distribute in site 147 tuan.

2. The affect of solubility salt to vegetation distribution was not nitability from the CCA ordination. The distribution of *Ass.Calligonum leucocladum —Haloxylon persicum* was related to sand erosion and sand importation. Indicate that this group has Strong capability to fit the extremely enviroment, which is the pioneer of the succession on the sand surface. The distribution of *Ass. Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius* is relate to organic materials and soil moisture. This group has strong dependence to environmental factor. Distribution of *Ass.Salsola paulsenii* relate to Ca^{2+} . It has minus relation to organic materials and soil moisture. This group has capability to endurance drought and leanness. But the capability to endurance the erosion is weak. The distribution of *Agriophylum squarrosum —Eremurus anisopterus* and *Ass. Seriphidium santolium —Ceratoides ewersmanniana —Limonium mill* were related to slop gradient and slop position, but have minus relation to sand importation and erosion, indicated that this type is strong dependent on environment. It is a type of medium-term of succession. Taking one with another, the species diversity,abundance, equality were in downtrend. The dominance was in accretion. The dominants were much

关键词：沙漠；植被；DCA； 分类排序；多样性; 稳定性

ABSTRACT

Gurbantunggut Desert locates north of Xinjiang zuengeer basin interior region, it is the only one desert settled and half settled that existence steady snow cover in winter. But the activation and dust devil has pricked up in this desert coursed by change of climate and people's disturbance, which has maximum impact to the environment and people's life. So the protection of desert's vegetation,prevent the activation of desert has been focus. The study chose three sites which have different vegetation and environment difference in 40km span in Mosuowan area. Abundance,height,coverage,calculated important value of every sample in three sites. The vegetation every sites was been classified by using TWINSPAN and DCA. For study the relationship between vegetation and environment, the ordination has been study by using CCA ordination.The factors which relate the stability of sand surface as abundance, diversity, coverage, soil moisture, sand diameter, and landform has been contrasted and analyzed.Use sand erosion and sand importation to valuate the stability. The study got thereinafter conclusion：

1. The vegetation has been classified five types:

1)Ass. *Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius*

2)Ass.Salsola paulsenii

3)Ass.Calligonum leucocladum —Haloxylon persicum

4) Agriophylum squarrosum —Eremurus anisopterus

5)Ass. Seriphidium santolium —Ceratoides ewersmanniana-Limonium mill

The environmental difference among samples is obvious for samples in different sites has different conglomeration from DCA ordination. Distributions of Groups in three sites is obvious, because that the accommodation of species was different. Ass. *Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius* mostly distribute in sites 150 tuan and 147 tuan. *Ass.Salsola paulsenii* mostly distribute in site 149 tuan. *Ass.Calligonum leucocladum —Haloxylon persicum* mostly distribute in sites 150 tuan and 149 tuan. *Agriophylum squarrosum —Eremurus anisopterus* and *Ass. Seriphidium santolium — Ceratoides ewersmanniana-Limonium mill* mostly distribute in site 147 tuan.

2. The affect of solubility salt to vegetation distribution was not nitability from the CCA ordination. The distribution of *Ass.Calligonum leucocladum —Haloxylon persicum* was related to sand erosion and sand importation. Indicate that this group has Strong capability to fit the extremely enviroment, which is the pioneer of the succession on the sand surface. The distribution of *Ass. Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius* is relate to organic materials and soil moisture. This group has strong dependence to environmental factor. Distribution of *Ass.Salsola paulsenii* relate to Ca^{2+} . It has minus relation to organic materials and soil moisture. This group has capability to endurance drought and leanness. But the capability to endurance the erosion is weak. The distribution of *Agriophylum squarrosum —Eremurus anisopterus* and *Ass. Seriphidium santolium —Ceratoides ewersmanniana —Limonium mill* were related to slop gradient and slop position, but have minus relation to sand importation and erosion, indicated that this type is strong dependent on environment. It is a type of medium-term of succession. Taking one with another, the species diversity,abundance, equality were in downtrend. The dominance was in accretion. The dominants were much

move obvious. The sand surface activity is deteriorating.

3. Abundance and diversity have no direct affect to steady of sand surface, the must be beneficial to coverage and equitability. Lesser sand diameter can enhance the capability that soil holds the water. But the bigger sand diameter can increase the wind speed startup. So when we evaluated the relationship between sand diameter and stability of sand surface the environment should be consider. On the one hand, soil moisture enhances the conglutination of the soil and lowers the intension of erosion. On the other hand, soil moisture coursed the distribution of vegetation. The height of the sand dune decides the slop gradient. The intension of wind activity in different slop position related to height of the sand dune and slop gradient, which related to the distribution of sand diameter and vegetation. So height of sand dune has considerable relationship.

4. according to synthetically analysis of factor which affects the stability of sand surface. The site of 147 tuan is most stable. The site of 150 tuan is better. The site of 149 tuan is worst. According to standard of sand erosion and sand importation, we got the same conclusion.

Key word: Desert; Vegetation; Diversity; Stability

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外 ，本论文不包含其他个人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，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：　　时间：　　年　　月　　日

学位论文版权授权书

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅。有权将学位论文的内容编入有关数据进行检索。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：　　时间：　　年　　月　　日

导师签名：　　时间：　　年　　月

第一章 绪论

1.1 问题的提出

生物与环境的关系一直是生态学研究的重点。群落是在一定空间范围不同物种组成的集合。是生态学研究的基本单位，生态学研究的很多问题都是在群落层次上完成的，如种间关系、格局分析、物种多样性研究、数量分类、生态位、群落演替等。群落是连接种群和生态系统的纽带，其自身又是由不同的物种组成占据一定时空的复杂系统。所以群落和环境的关系研究一直的植物生态学研究的重要部分。植被是生态系统存在的基础，也是联结土壤、大气和水分的自然纽带，它在陆地表面的能量交换过程、生物地球化学循环过程和水文循环过程中扮演着重要的角色，在全球变化研究中起着“ 指示器 ”的作用[1]。植被覆盖度是评估土地退化、盐渍化和沙漠化的有效指数[2]。

古尔班通古特沙漠是我国仅次于塔克拉玛干沙漠的第二大沙漠，也是我国干旱区唯一的固定、半固定沙漠。近年来，随着沙漠腹地油气资源开发，道路兴建和引水工程等重大工程建设项目的展开，人类活动对原始地表的扰动及稳定性恢复等问题已引起广泛关注[3]。北疆气候自 50 年代以来虽然温度升高,降水略有增加,但是气候变化呈现为暖干过程;并且古尔班通古特沙漠的流沙化面积不断地增加,沙漠化现象日趋严重。同时,由于近年来气候变化加剧。加上人类大规模工程建设活动的影响，更加剧了沙漠的活化。总之,不管是什么原因造成的沙漠化和固定沙丘的活化，如果不采取积极的防御措施,都将给人类生活与生存环境带来极大危害。

另外，由于不同的植物对环境适应能力的差异，物种组成的差异必然反映其所处环境的差异，同质的环境必然造就相似的植物群落。环境变化对植物的影响在相似的群落之间更容易表现出来。固定半固定沙漠植物呈斑块状分布，而且群落之间在一定的范围内具有相似性，在大的范围内表现出一定的变化，而且这种变化呈连续性。植物群落因地貌景观和生境变化而异，总体趋势是：沙漠北缘的草原化荒漠平原以驼绒藜群落为主；沙漠低洼区或沙漠南北缘荒漠平原则以梭梭群落为主；垄(丘) 间地和沙垄(丘) 坡下部分布蛇麻黄群落；半固定半流动流动沙垄(丘)顶部及坡上发育白梭梭群落，而在复合沙垄区、半固定垄顶及垄坡生长沙漠绢蒿群落[4]。可见小生境的改变能导致群落物种的演替，并改变群落的外貌。

虽然古尔班通古特沙漠与其他沙漠相比，气候环境、地理环境具有得天独厚的条件，但毕竟处于干旱区，水是影响植被发育的限制性因素，加上土壤发育不完全，土壤基质稳定性比较差。所以，植被对环境变化比较敏感。风是塑造地貌形态的基本营力之一，特别是在干旱气候条件下，风是决定沙漠地表形态的主要动力[5]。对于任何沙丘，作为一凸起的形态处于流动的大气中时，沙面阻挡与气流相互作用便形成其自身的特征气流。它首先影响沙丘表面输沙率和蚀积形式，进而影响沙丘形态及其变化过程。此外，风也是造成风沙危害的直接动力条件[6]。虽然在一定的时间和空间范围内，大范围的植被盖度把风沙活动抑制在一定的区域内，但由于风力的长期干扰，古尔班通古特沙漠沙面环境处于长期的变动之中，群落的生态稳定性也相对较差。所以，了解植被与环境的关系，特别是植物分布与沙面稳定性的关系，对维持古尔班通古特沙漠现有环境、恢复由于人类活动造成的环境破坏、抑制风沙活动、防止沙漠化扩大具有重大意义。

1.2 研究区概况

1.2.1 气候地理

古尔班通古特沙漠位于我国新疆北部准噶尔盆地腹地（北纬 44°15′～46°50′，东经 84°50′～91°20′，海拔 300～600m，面积 4.88 万 km^2。是我国唯一在冬季存在稳定积雪的固定与半固定沙漠[7]。主要受西北风影响，沙垄呈西北—东南走向，主要沙丘形态类型为梁窝状和树枝状沙垄，平直作线状伸展，长度可以从数百米到十多公里；高度一般在 10～25 m，个别高者达 50～100m。两侧斜坡比较对称，以沙漠中部的南北走向的沙垄为例，西坡一般为 15～24°，东坡为 19～28°[8]。古尔班通古特沙漠远离海洋，位于亚洲大陆中心，是中亚受西风环流影响下的温带荒漠区的一部分，属大陆性荒漠气候。其特点是蒸发强，日照长，降水稀少，温度变化剧烈。当地被高山环绕而阻挡了水汽的进入，长期处于蒙古高压控制之下，气流下沉，成雨机会少。年均温为 6～10°，极端温度为 40°以上，≥10℃的活动年积温可达 3000～5000℃，空气相对湿度平均为 50～60%，5～8 月通常在 45%以下[9]。沙漠年均降水量不超过 150 团 mm，沙漠腹地仅有 70～100mm，而蒸发量却高达 2000mm 以上，是降水量的 20～30 倍，干燥度较大。降水量以夏季最多，冬季有稳定积雪，约占年降水量的 30%左右[10]。年降水量虽然较少，但季节分配却较其它沙漠均匀。控制本区域的风系主要是西风气流和蒙古高压形成的 NW 和 NE 风系。NE、NW、WNW 和 SE 方向的起沙风频率分别为 14.6%、11.6%、10.1%和 10.1%，占总频率的 76.9%。起沙风集中于 4～9 月，其中 4 月、5 月、6 月、7 月 4 个月平均风速分别达到 4.2m/s、4.7 m/s、3.7 m/s 和 3.9 m/s，风沙活动强度分别占全年总风沙活动强度的 14.1%、19.1%、14.8%和 10.6%。风沙运动的路径为典型的摆动式、中速、少稳定型，风沙运动方向由北至南[11]。

1.4.2 植被特征

古尔班通古特沙漠内植物种类较丰富，可达百余种[12]。面积分布最大的沙漠植被群种是梭梭(*Haloxylon ammodendrom*)和白梭梭*(Haloxyon letapersici*)群系，分布面积 100 万 ha，在古湖积平原上形成“荒漠丛林”两种梭梭都具有发达的根系。主根垂直向下扎入土(沙)体的深度，通常都超过 5m，水平伸展的侧根长达 10m 以上，且往往分上下两层[13]。在固定沙丘上植被覆盖度可达 40%～50%。沙漠中部枝状与梁窝状垄间连接处有白梭梭、沙拐枣、三芒草出现。沙漠南缘丘间地遍布琵琶柴、梭梭、红柳、白刺，白沙蒿、局部有胡杨、蛇麻黄，驼绒藜、类短命植物有异翅独尾草、粗柄独尾草、囊果苔草、准噶尔太阳芪等[120]。在半固定沙垄上的白梭梭群落内常伴有灌木的沙拐枣(*Calligonum leucocladum*)，无叶豆（*Eremospart onsongoricum*）、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)；小半灌木的蒿类、多年生禾草、羽毛三芒草(*Aristide pennata*)；一年生草类沙蓬(*Agriophlluma renarium*)、倒披针叶虫实*(Corispermum lohmannianum*)等。短命植物和多年生短命植物有：粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis*)、齿稃草(*Schismus arabicus*)，东方旱麦草(*Ermopyrum orientale*)等[14]。

1.4.3 土壤特征

古尔班通古特沙漠土壤发育于第四纪的粘土与细砂层构成的古老冲积平原上，砂基质

主要由中细砂组成[15]。半流动沙丘间断分布在平缓低洼地和平缓沙地之间，风沙土质地以细沙为主，细沙所占比例在 80%以上。干沙层厚度 20cm 以上，pH 值约为 8.4，土壤含水率低于 4%，含氮（N）量为 0.13%～0.2%[16]。沙漠及其边缘地区以固定、半固定风沙土为主，少数为流动风沙土。风沙土多以垄状沙丘为主，在春季雪水融化以后，沙丘中有较厚的悬湿沙层。中部和北部为树枝状沙垄，南部为蜂窝状沙丘[17]。沙丘顶部为流动风沙土沙丘中下部为固定半固定风沙土，在沙丘间低地则主要分布着龟裂状灰漠土与小面积的残余沼泽土及龟裂土以及它们之间的过渡性土壤，土壤质地较细，机械组成为壤质[18]。整个土壤剖面颗粒大小基本一致，土壤表层有明显的腐殖质特征。

1.2.2 莫索湾地区概况

莫索湾垦区位于古尔班通古特沙漠南缘,处于天山垂直带与沙漠交界过渡带,南对天山,与石河子地区、沙湾县和玛纳斯县相邻,是屯垦于古尔班通古特沙漠腹地的新疆生产建设兵团148、149团 和150团 团出入的咽喉，地理位置极为重要[20,21]。主要沙丘类型为梁窝状和树枝状沙垄，长度数百米到10 km 多不等，近南北走向．顶部普遍存在宽度不等的流动带[22]]。 该沙漠≥10℃年积温为 3000~3500℃, 年降水量 70~150团 mm, 年蒸发量2000 mm 以上，冬季有 20 cm 厚的稳定积雪,该区域属典型的大陆性、干旱半干旱沙漠气候。春夏季为风季,最大风速20m · s- 1 ,地下水13 m左右。上述自然条件使垦区沙漠植被自然恢复更新能力低,加上人为过度樵采和放牧,以及滥垦等不合理的经济活动,造成绿洲外围沙丘活化,形成流沙带"流沙侵入绿洲,造成土地沙质荒漠化[23]。沙漠中小半灌木、半乔木群落广泛分布,代表植物有心叶驼绒藜、梭梭、琵琶柴(*Reaum uriasoongorica*) 、沙拐枣(*Calligonumm ongolicunl*) 、羽毛三芒草(*Aristida pennata*) 、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)等。

1.3 研究的目的和意义

1.3.1 研究目的

本文在古尔班通古沙漠南缘的莫索湾地区，在平均相距40km的尺度上选取三个具有明显差异的植物群落的样地，在不同的环境和群落内研究在沙面的稳定性。因此，所有工作将围绕以下目的展开：

（1）为了明确研究区内样地的植被类型，在野外调查获得相关数据信息的的基础上，应用 TWINSPAN 分类和除趋势对应分析(DCA)排序方法的结合使用对相关数据进行进一步分析，从而达到对各样地的群落进行分类，了解群落内物种分布及其亲疏关系目的，并获得各群落的群落学特征，以便对各样地群落进行对照分析区分。并用图表的形式直观的表示出来，从而了解环境因子对群落类型的影响打下基础。

（2）此外，在获得群落分类结果的基础上，应用典范对应分析(CCA)对群落物种和环境因子进行排序，分析其生态意义，进而了解各样地植物分布格局与环境因子之间的生态关系，并对分类的结果进行验证。通过对以上各样地群落和环境分析的结果的对比，进一步分析在不同的植被类型下影响植物分布环境因子，从而揭示影响沙面稳定性的环境因子及其影响的一般方式。

（3）对于沙面的稳定，不同的学者由于研究方向和注重方面的不同而各持己见[62-78,129-136]。为了得到更加全面的认识，我们将从物种丰富度、植物多样性、均匀度、

覆盖度、土壤基质类型、土壤水分、地形等方面对沙面的稳定性进行综合评价，并按不同的级别予以划分。

1.3.2 研究意义

沙漠化是指干旱、半干旱和部分半湿润地区，由于受自然因素或人类活动的影响，破坏了自然生态系统脆弱的平衡，使非沙漠地区出现了以风沙活动为主要标志和类似沙漠景观的环境变化过程，以及在沙漠地区发生了沙漠环境条件的强化与扩张过程。

对于荒漠化防治，植物治沙是控制和固定流沙的一种有效而经济、最根本的措施。植物防治土壤风蚀作用早已为人类所知，目前在世界各地已被广泛的应用。在土壤风蚀量的预报中，植被被列为主要的影响风蚀因子之一。植物通过三种方式阻止地表风蚀或风沙活动。首先，植被通过覆盖部分地表，使被覆盖部分免受风力的侵蚀作用；其次，一定高度的植物能有效降低风速；第三，拦截被风力扬起的沙粒促使其沉积下来。最重要的是植被的生态建设作用，特别是植被建设将能永久地改善沙漠化地区的自然景观，防止土壤的进一步风蚀，同时也能促进了自然景观的恢复。

在新疆，由于全球环境变化以及人为因素的影响，沙漠化，固定沙丘的活化等一系列问题正在加剧，所以，对固定沙丘的保护，以及反沙漠化成为人们关注的焦点。由于环保力度小于开发力度，导致古尔班通古特沙漠东南缘土地沙漠化加重。在上个世纪，古尔班通古特沙漠有3%的活性沙丘，而到本世纪初增加到 15%。如今这一地区沙漠化土地面积已达19355km^2，比 1986 年扩大了 973km^2，年均扩大 51km^2。再加上地下水位下降，使大量荒漠植被衰退死亡，从而导致沙漠化程度加剧。大量的野生植物遭到破坏，一些珍稀的濒危动物死亡。土地沙漠化程度加剧及生态环境的恶化，使得自然灾害频发，极端天气事件增多，在一定程度上制约了当地经济的可持续发展[24]。在目前国家西部大开发的环境下，许多重大的工程也在沙漠地区展开，但这无疑对原本就比较脆弱的沙漠生态环境造成了极大的压力。鉴于沙漠工程行为规模大、强度高的性质和沙漠生态环境的脆弱性，对该类地区进行退化生态系统的调查与监测，明确目前一些重大生态保育与恢复工程的参照恢复模式，合理确定和评价生态恢复的程度等问题都需要我们去了解非人为干扰区植被的分布与沙面稳定之间的关系。本研究从植被类型和沙面稳定的关系出发，了解不同的植被类型的变化与样地环境差异的关系。进而确定在不同的环境下植被演替的一般模式。从而为沙漠环境的评价、沙漠恢复工程、确定合理的生态恢复模式提供科学依据。

第二章 文献综述

2.1 群落学研究进展

2.1.1 群落的概念

关于群落的概念可以追溯到19世纪初，早在1806年Humboldt[122]就已认识到在一个

地点，一定种类的植物总是生长在一起，遵循一定的规律而集合成群落（community）它的重要性是因为由于群落的发展而导致生物的发展”．他指出每个群落都有其特定的外貌，它是群落对生境因素的综合反应.V. E. Shelford [124]甚至说“ 生态学就是关于群落的科学。 ”可见群落在植被研究中的地位是十分重要的。

近年来，随着植被群落学和生态学研究的进一步发展，群落生态学已经成为了新兴学科——恢复生态学的基础,因此，研究植物群落的相关问题不仅具有重要的理论意义，同时还与植被资源管理以及受损生态系统的恢复和重建有着直接联系。1890年丹麦植物学家E.Warming[25]出版了经典著作《植物生态学》的副标题为“ 植物群落研究引论 ”。同时俄国对植物群落的研究有了较大的发展，并形成一门以研究群落为对象的科学——地植物学[26]。但是对于什么是植物群落plant community 却有不同的表述。Warming认为一定种所组成的天然群聚即群落，他强调了种间关系对群落形成的影响。而俄国植物学家对群落概念的理解以B.H.苏卡乔夫[27]为代表，他认为群落是不同植物有机体的特定结合，在这种结合下，存在植物之间以及植物与环境之间的相互影响。Tüxen[125]的群落定义是：“ 植物群落+动物群落=生物群落是一个经过生境选择的，由植物或动物组成的功能单位 ”。Odum[28]在他的《生态学基础》一书指出：除了Shelford的定义外，群落还具有一定的营养结构和代谢格局。并指出群落的概念在生态学中的重要地位。比利时学者P.Duvigneaud（1974）在他的《生态学概论》中对群落作出了相似的定义：“ 群落是在一定时间内居住于一定生境中的不同种群所组成的生物系统 ”。在第三届布鲁塞尔国际植物学会上，为了澄清术语的含混，给植物群落所下的定义是：“ 群落是有一定区系组成一致生境条件和一致外貌的植物组合 ”。虽然对群落的概念，不同的学者观点各异，但群落在植被和生态学研究中的地位是得到共识的。

2.1.2 个体论和机体论之争

关于群落的性质问题，生态学界存在两种对立观点。一是机体论观点，另一个是个体论观点。在植物生态学发展的早期，美国生态学家Clements(1916,1928)就把群落比拟为一个有机体，群落的演替过程类似于有机体的生活史，他认为群落像有机体一样，有诞生、生长、成熟、死亡的不同发育时期。并认为这种比拟是特别真实的。法瑞学派的创始人Braun-Blanquer（1928，1932）和Nichols，（1917）Warming（1909）把植物群落比拟为一个种，并把植物分类的方法引入群落的分类中。但他忽略了种是一个遗传单位，而群落在遗传上却与其他相似的群落无关。动物学家möbius和Elton也支持机体论观点。

H.A.Geasonzai 1926年发表了“ 植物群丛中的个体论概念 ”一文，他认为机体论的观点是欠妥的。他认为群落的存在依赖于特定的生境与物种的选择性，由于环境条件在空间和时间上都是不断变化的，因此群落之间不存在明显的边界，也没有完全相同的群落或相互密切关联。前苏联学者R.G.Ramensky和美国学者R.H.Whittaker均持类似观点并用梯度分析和排序等方法研究植被，并证明他们的观点。两派因为研究区域与对象不同而各持己见。而有的学者认为，现实的自然群落可能处于个体论到机体论的连续普中的任何一点。

2.2 传统植被分类

植被分类的重要性早在本世纪初就被人们所认识，从那时起，许多传统的分类方法和分类系统逐渐建立，由此也导致形成了许多地植物学派。

一个群落区别于另一个群落最重要的特征就是：群落的种类组成及其数量相互关

系，质量相互关系；群落的结构；群落的外貌等特征。
1）群落的种类组成及其数量相互关系，质量相互关系
群落的种类组成是决定群落结构及其外貌的基本因素。一个地区的地带性植被，具有一定的植物区系成分。因此，研究一个群落，必须研究群落中每种植物的名称及其地理分布、结合对群落中组成种类进行其数量相互关系（多度、频度、盖度）、质量相互关系的研究，以确定群落的建群种、优势种、特征种、偶见种，最后才能确定一个群落类型的组成成分[29]。
2）群落的外貌
植物群落优势种的生活型、高度等所表现的群体外貌均为群落外貌所包括的特征。
3）群落的结构特征
包括植物群落的水平结构和垂直结构，在群落中不同生活型的植被组成不同的层片，不同的层片即可能出现在同一层，有可能出现在不同的层次中，因此既包含水平结构的含义又包含垂直机构的含义[30]。层与层片结构的复杂程度，是植被分类的只要依据之一。

2.3 植被数量生态学

植被数量生态学是指用数学的方法研究植被、植物群落及植物种与环境之间生态关系的科学，也叫做植被定量分析（Quantitative Analysis）或者植被分析（Vegetation Analysis）。植被数量分析有其独特的研究方法，它客观、准确地揭示了植物群落、植物种与环境之间的生态关系，已成为国际上植被生态学最重要的研究内容之一[31~34]。

2.3.1 植被数量分类进展

植被数量分类是植被分类的分支学科，它是用数学方法来完成分类过程。数量分类可以处理大量数据，获得的信息量大，分类的精度较高，速度也快。数量分类是基于实体或属性间相似关系之上的。因此，大部分类方法首先要求计算出实体间或属性间的相似（或相异）系数，再以此为基础把实体或属性归并为组，使得组内成员尽量相似，而不同组的成员则尽量相异。同的分类方法只是进行此项工作的不同实现过程[35]数量分析方法萌芽于 1930～1940 年代，但只进行一些简单的系数计算。1960 年代以后，由于电子计算机技术的发展而逐渐被推广应用。到 20 世纪 70 年代年代，国际上已形成数量生态学的理论和方法体系。1980 年代以后，植被数量分析作为一个较完整、较系统的学科已进入一个较为成熟的阶段，新方法数量的增加速度虽大为降低，但随着人们对这些知识的进一步研究，发表的相关论文数量却在大幅度增加。由此可见，数量分析依然是现代植被研究必不可少的重要手段[36~37]。

国内植被数量生态学的研究起始于 1970 年代，随后二十几年内，我国植被生态学在分类、排序、生物多样性、种间关系、生态位、空间格局以及群落演替等方面有很大进展[38~39] 。

各种数量分类方法的特点：

（1）关联分析法

关联分析（Accociation Analysis）是一种单元、分划的群落等级分类的方法，即根据一个属性（例如种）将整个样方集合逐次细分而得到不同样方组的方法。曹霞等[42]

按照《中国植被》的分类原则和方法，根据群落结构和生态外貌，结合聚类和排序等数学手段对样方资料进行处理，应用关联分析法对大凌河滨河植物群落进行数量分类的结果与实际相符，此方法方便简洁。阳含熙等[40]和艾训儒[41]分别运用关联分析法对福建三明光叶红椎林和狮子关库区植物群落进行分类，得到了比较理想的分类结果。

（2）聚类分析法

聚类分析（Clustering Analysis）是植物群落数量分类学中应用的主要数学方法，经典聚类法以经典集合论为基础，任何一个与类群间“非此即彼”的关系，在简化问题的同时又丢失了相当一部分信息[43~45]。余小平等[46-47]分别利用模糊聚类对荆条灌丛和亚热带地区暖性次生针叶林进行群落分类表明，此方法对低级单位的分类的结果更加理想；

（3）信息分析（Information Analysis）

信息分析是一种多元、聚合的群落分类方法。根据群落的全部属性（种）用一种特定的信息增量计算去度量样方组之间的相似性，聚合的过程是从单个样方开始逐次把彼此最相似的样方小组聚合成比较大的组，最后将全部样方都聚合成一个组时为止。阳含熙等运用信息分析法对内蒙古呼盟羊草草原进行分类，分类结果与定性和关联分析分类的结果吻合[48]。

（4）典范指示种分析法

是以典范对应分析（CCA）排序轴为基础的植物群落外在分类法[49]。因此，典范指示种分析法能同时反映种类组成的差异性和环境因子对植被的影响，以及各环境因子在植物群落分类中的综合作用。张金屯[50]利用典范指示种分析法对英国威尔士北部山地草甸的数据进行分析，并将分类结果与双向指示种（TWINSPAN）对其的分类结果进行比较，两者分类结果较为吻合。

（5）双向指示种分类法

双向指示种分析法（Two Way Indicator Species Analysis，TWINSPAN)是由 Hill 在指示种分析法的基础上发展起来的一种国际通用的多元等级分划方法[51,126~127]可用指示种鉴别特定的环境生态条件，结果更符合植被分布的自然规律。郭东罡等[52]对中条山中段的植物群落进行数量分类，虽然该分类法是当今最主要的分类方法被广泛采用，但在具体分类过程中，应该充分考虑群落生境的特征和植物物种在群落中的重要性地位。

（6）群落排表分类法

群落排表分类是 Braun－Blanquet 学派的主要研究方法。1994 年，张金屯[53]描述了 X2 分类方法和信息熵分类法，以德国西北部草地数据为例进行了应用和分析。2006 年，兰国玉等[54]利用群落排表分析法对秦岭华山松进行了分类，分类结果与聚类分析的结果基本吻合。将数值分类排序方法与 Braun-Blanquet 途径结合起来进行植被分类是可行的，效果良好。

（7）有序样方聚类（Ordered PlotClustering，OPC）是一种基于黄金分割法的非等级分类的聚类方法，其基本原则是按照样方序号，确保样方组内相似性最大，样方组间相似性最小来实现分类，对全部样方进行分类[55-56]。2000 年，茹文明等[57]在野外调查的基础上，应用有序样方聚类法对中条山东段植被的垂直带进行了数量分类研究，有序样方聚类法的结果更符合实际情况，因此，有序样方聚类法是一有效的植物群落数量分类方法。

2.3.2 植物群落排序研究进展

早在 20 世纪 30 年代，前苏联学者 Ramensky 就提出了排序的概念，并发展了一个简单的排序方法。排序最初是通过对群落内样方在空间的排列来研究群落之间的连续性，到了 50 年代后期，排序的概念得到完善，排序方法也得到不断改进，不仅仅用于对样方的排列，也可用于排列植物种及环境因素，用于研究群落之间、群落与成员之间、群落与其环境之间的复杂关系。

50 年代末，计算机的出现，极大地推动了数量分析技术的发展。许多新方法出现，计算复杂的多元分析方法也被引入，克服了简单统计方法的一些缺点。数量分析展现了其巨大的优越性，并逐渐得到广泛的应用。到 70 年代，国际上已形成数量生态学的理论和方法体系，同时大量新方法的出现也引起了广泛的重视。1980 年 Hill 和 Gauch 提出了除趋势对应分析 DCA（ Detrended Correspondence Analysis)它是由 RA 修改而成的，克服了 RA 所具有的“ 弓形效应 ”，提高了排序精度。DCA 一方面可与回归分析、相关分析结合应用，另一方面 DCA 能综合大量环境因子，因而又可以与其他分类、排序方法结合应用，随后又有国际通用软件 CANOCO 的出现，使 DCA 成为现代植被生态学研究不可缺少的重要手段[127]。此后，随着研究问题的细化和实验要求的提高，相继又出现了典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis,CCA)、除趋势典范对应分析（ Detrended Canonical Correspondence Analysis, DCCA)、模糊数学排序(Fuzzy Set Ordination, FSO)等排序方法。在应用的过程中得到是实践的进一步检验。其中，典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis,CCA)是把 RA 和多元回归结合起来，每一步计算结果都与环境因子进行回归，从而详细的研究植被与环境的关系，在结果的表示上，CCA 可将样方排序、种类排序及环境因子表示在一个图上，可以直观地看出他们之间的关系。但 CCA 是以 RA 为基础的，它保留了 RA 的缺点，即弓形效应。为了修正这一点，又产生了一个叫除趋势典范对应分析(Detrended Canonical Correspondence Analysis,DCCA)新方法，使得弓形效应所造成的偏差得到矫正，在数量分析中取得了更为满意的结果[58]。模糊数学排序(Fuzzy Set Ordination,FSO)发表于 1986 年[128]它是基于模糊集理论之上的一种直接梯度分析。FSO 首先要求选择适当的环境梯度，并将环境数据转化成一模糊子集，以环境模糊子集和样地相似矩阵为基础求其排序坐标(新模糊子集)[59~60]。也可以用两个环境梯度，以使结果更好地反映植被与环境的关系。其分辨率较高，可以较好地与分类方法结合使用，其本身也可以作为一个植被分类方法[61]。

排序的过程是将样方或植物种排列在一定的空间，使得排序轴能够反映一定的生态梯度，从而，能够解释植被或植物种的分布与环境因子间的关系，也就是说排序是为了揭示植被-环境间的生态关系。

2.4 沙面稳定性研究进展

中国沙漠的变化，受气候变化影响比较突出，特别是东亚季风，它不仅影响中国东部的旱涝和冷暖的气候变化，而且也影响了北方沙区的正逆发展。随着气候的波动，沙地以交替过程发生着变化。大尺度的气候波动决定着自然沙漠化过程和沙漠形态与边界，而小尺度的气候波动，将导致沙漠生态环境的干湿度变化。诸多的研究也证明，历史时期沙漠的扩展和收缩主要是由于气候波动引起的；并且还经历了数次沙漠化和非沙漠化的扩展和退缩、活化与自然固定的正逆变迁过程[62]。

研究沙漠地区生境异质性与植被格局的关系对恢复沙漠植被、稳定沙漠生态系统和防治沙漠蔓延具有重要意义。国内外众多学者以其为焦点做了大量工作[63~65,130~132]。

Dasti 等应用 TWINSPAN 和 DCA 统计工具分析了巴基斯坦境内两大沙漠植物群落的组成、结构、以及其与环境因子的关系[133]。]陈鹏等以变异函数描述古尔班通古特沙漠绿洲。荒漠过渡带植被与土壤空间异质性，并用地统计学软件 GS⁺做数据处理[66]。 张元明等则借助 TWINSPAN 和 CCA 统计分析手段,阐明了塔克拉玛干沙漠边缘带,塔里木河流域植被和其他环境因子的组合及空间分布[67]。

古尔班通古特沙漠位于新疆北部的准噶尔盆地,面积4.88万km^2,是中国第二大沙漠，也是中国固定和半固定沙丘分布面积最大的沙漠。古尔班通古特沙漠虽然处于温带干旱荒漠环境下,但沙丘主要以固定和半固定类型为主,与隶属于半干旱区的呼伦贝尔沙地、乌珠穆沁沙地、浑善达克沙地和毛乌素沙地相似。一般而言，固定和半固定沙丘通常形成在水分条件较为优越的环境下，如毛乌素沙地，其东部多年平均降水为400～440mm，西部也达250mm[68]。不仅如此，其地表水和地下水也较丰富。然而准噶尔盆地的环境要恶劣得多。对于古尔班通古特沙漠固定半固定成因，成为学者们关注的焦点。有人认为，准噶尔盆地之所以以固定和半固定沙丘为主，主要是受西风和极地冷气团影响，降水分配比较均匀，且冬、春季经常积雪[69]。2000年，季方，魏文寿等对古尔班通古特沙漠固定半固定成因进行了初步研究，他们认为古尔班通古特沙漠固定半固定成因有如下几个方面的原因：

1)降水的季节变化小。而且在冬、春季有一定量的降水，有利于沙丘的固定。

2)冬季地表有积雪和悬湿砂层的存在。促进了植物特别是短命和类短命植物的生长。同时，在其它季节因暴雨影响，也有悬湿砂层出现。

3) 土壤的微弱发育。沙漠区域固定沙丘表层0.5-lcm有机质含量明显高于下层，与下层相比已有微弱的分化，进一步加强了沙丘的固定。

4)在沙漠区域的丘间地和背风坡植被覆盖度高。沙漠区域风季是在4-7月，这一时期大风日数占全年的55%一80%。而这时在沙漠区域的丘间地和背风坡植被覆盖度最高，它除了小半乔木、灌木、小灌木、半灌木和多年生草本外，还有大量的短命和类短命植物及低等植物存在，使得沙漠区内植被覆盖度达到30%以上，因而有效地阻止了沙丘的移动范围和强度。

5)砂物质粒度较粗。在古尔班通古特沙漠砂物质的粒度分布中,中、粗沙含量可达300g/kg以上，明显高于塔克拉玛干沙漠砂物质的粒度[70]。

上述观点基本得到大多数学者的认同，但由于研究范围和对象的不同，不同的学者对造成古尔班通古特沙漠固定半固定的主要原因也存在差异。。他们从不同视角诠释该沙漠沙面稳定的机理。有研究者认为盆地中冬季一定厚度的积雪和冷湖效应形成的冻土层,以及春夏季风沙土中的悬湿层等，可有效保持中深层土壤的墒情。另有学者强调发育良好的植被、短命植物、生物结皮等的固沙作用。更有人注意到该沙漠沙面的固定与半固定不但和植被的较高盖度有关,还和植被的生物多样性关系密切,即多层片植物群落的组合最能有效降低沙面的活动性。植被在稳定古尔班通古特沙漠中所起的重要角色,使近年许多研究的焦点聚于该沙漠植物群落格局和物种多样性及与土壤、气候等环境因子的耦合关系。

张元明，王雪芹等运用风洞实验研究生物结皮对沙面启动风速的影响来探讨结皮对沙面稳定性的贡献，实验结果表明：相同破损率条件下，起动风速以苔藓结皮最大、地衣结皮次之、藻结皮和藻类地衣结皮最小.表明生物结皮的存在大幅度提高了起动风速,显示出其在沙面稳定性中的巨大作用．古尔班通古特沙漠沙面稳定性随地貌部位不同

而发生明显的分异，沙垄垄间和沙垄中下部为固定状态，中上部和顶部多处于半固定和流动状态，生物结皮类型随地貌部位的变化及其抗风蚀性能的差异性是这种分布的重要影响因素.苔藓结皮、地衣结皮和藻类结皮依次分布于垄间、坡中部和坡上部，垄顶部为裸露沙面，而地表抗风蚀性能又以苔藓和地衣结皮明显优于藻类结皮和裸沙面，因此可以说沙面稳定性的这种空间变化和生物结皮类型的选择性分布密切相关[71]。陈亚宁等在也在沙丘的尺度进一步说明了生物结皮对土壤环境改良，促进草本植物，特别是短命植物生长的作用[72]。

2002年，在张立运的《论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点》一文中，全面探讨了古尔班通古特沙漠植物多样性的特点以及原因，同时指出古尔班通古特沙漠与在同一纬度上其他沙漠相比，在植物丰富度、群落类型，植被类型上的差异，强调了藜科植物在沙漠物种组成的重要性，也说明了植物丰富度对沙漠稳定的意义[73]钱亦兵[74]等通过对 11 个样地的调查，发现该研究区沙漠地貌纵、横形态上有显著差异，从而使沙漠植被分布格局存在着异质性，即植物群落的物种多样性、优势度及盖度在纵、横向上明显不同。CCA（典型对应分析）排序结果显示：土壤的有机质含量、全盐含量、分选系数、含水量和PH值等微生境使植被沿其变化梯度以不甚耐盐碱的短命、类短命草本和小半灌木、半灌木为主的群落逐渐向耐盐碱的灌木、小乔木类群落转变。

植被的存在可有效抑制风蚀和减小沙面活动,其作用主要取决于盖度,其次是高度和宽度[135]。董宝治，陈渭南等研究了植被对风沙土风蚀作用的影响。他们的研究结果表明植物的分布与地表粗糙度存在一定的函数关系，均匀分布较集中分布能产生更大的地表粗糙度，植被的盖度和密度与植被的抗风蚀能力直接相关[75~77,136~137]。

此外，王学芹等也从短命植物在沙丘的时空分布探讨短命植物对沙面稳定的意义，他们认为短命植物在风沙活动最强的时期（4、5、6 月份）以较大的盖度降低了风沙活动的强度，对沙面的稳定性作出了很大的贡献[78]。

第三章 植被的分类和排序

3.1 研究方法介绍

3.1.1 双向指示种分析

双向指示种分析（Two-way indicator species analysis, TWINSPAN）

TWINSPAN的特点是用与样方分类相同的方法进行种类分类，同样得到一个种类等级分类。样方分类和种类分类可以分开以树状图表示，不过多数情况下，是将二者结合起来排在一个矩阵中，得到一个双向分类矩阵，TWINSPAN是近20年来应用比较广的数量分类方法，其结果的可靠性得到广大学者的认可[79~83,138]。

3.1.2 除趋势对应分析

除趋势对应分析(DCA)是以 CA/RA 为基础修改而成的一个特征向量排序。DCA 把第一轴分成一系列区间，在每个区间将平均数定为零而对第二轴的坐标值进行调整，从而

克服了弓形效应，提高了排序精度。在现有的方法中，DCA 与高斯的群落模型最为吻合，也是在植被分析中最为有效的一种方法[84~87]。

3.1.3 典范对应分析（CCA）

典范对应分析（CCA）是由CA/RA修改而产生的新方法。它是把CA/RA和多元回归结合起来，每一步计算结果都与环境因子进行回归，而详细的研究植被与环境的关系。郭水良等应用CCA分析研究，取得了较好的效果[88~93,138]。
以上数据在各样地均重负三次取样。

3.2 野外调查

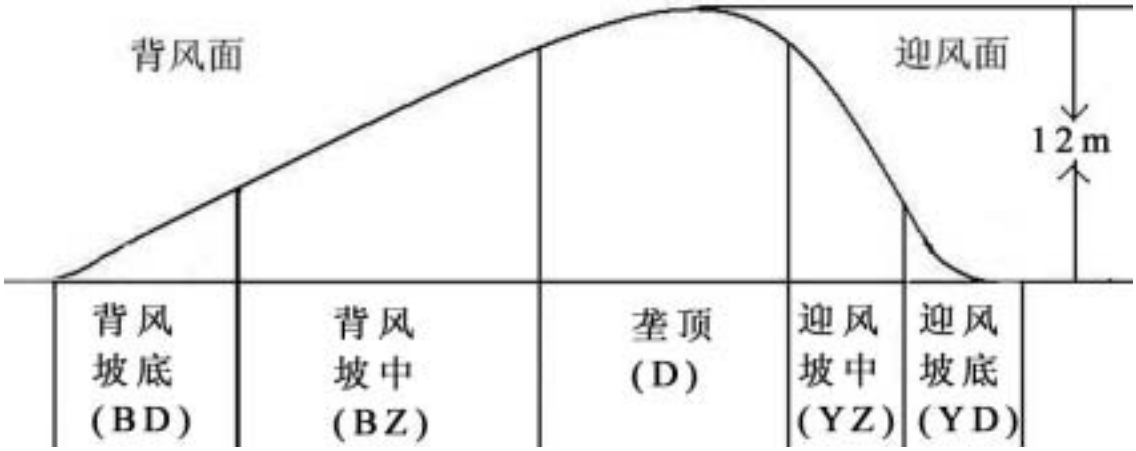

图3-1 样地设置示意图

Fig.3-1 the enactment of sample site

注：YD、YZ、D、BZ、BD 分别分为迎风坡底部、迎风坡中部、顶部、背风坡中部、背风坡坡部。

样地分别位于漠索湾地区的150团、149团和147团团，各样地之间的空间跨度平均为40km。各样地选取典型沙丘。测定沙垄的高度及两坡坡度（SLO）。并沿沙垄坡位把整个沙垄划分为迎风坡底部、迎风坡中部、顶部、背风坡中部、背风坡底部作为取样带。坡位数据采用赋值法[79]获得。

3.2.1植被的调查

每个坡位上做样方调查，乔灌层样方单位为20m×20m，在乔灌层的取样范围内，草本层植物以1mx1m为样方单位，随机取5个样，采取样用数码空中高清晰拍摄[139]，同时对样方内的植物采集标本进行鉴定。计算样方中每种乔灌层植物的株高、株数、盖度、冠幅等数据。计算草本层样方中每种植物的株数、盖度。盖度的计算采用Photoshop cs3和Excels辅助进行。

3.2.2 沙漠稳定性的测定

沿沙垄走向把整个沙垄划分为迎风坡底部、迎风坡中部、顶部、背风坡中部、背风坡底部作为取样带，共取5条样带，每条样带长度为100m。在每条样带上每隔10m插扦同时设置输沙计，插扦用于从测定沙面的积量，蚀输沙计用带刻度的量筒埋植于沙土中，上部与沙面齐平。在每个高度水平上，对风沙活动进行监测。

3.2.3 土壤理化性质测定

在每条样带上取样，每个样点 0～10cm、10～20cm、20～30cm 不同深度取土进行土壤理化性质分析。土壤有机质含量、CO32- 、HCO3- 、Ca2+ 、Mg2+ 、SO42-等离子含量的测定参照鲍士旦的《土壤农化分析》。

有机质含量测定使用重铬酸钾容量法——外加热法测定，具体技算方法如下：

$$\text{土壤有机碳\%} = \frac{(V_0 - V) \times N \times 0.003 \times 1.1}{\text{烘干土样重}} \times 100$$

式中：V_0——滴定空白时所用 $FeS0_4$ 毫升数；

V——滴定土样时所用 $FeS0_4$ 毫升数；

5.00——所用 $K_2Cr_2O_7$ 毫升数

0.8000———1/6 $K_2Cr_20_7$ 标准溶液的浓度；

0.003———碳毫摩尔质量 0.012 被反应中电子得失数 4 除得 0.003；

1.724———有机质含碳量平均为 58%，故测出的碳转化为有机质时的系数为 100/58≈1.724；

1.1———校正系数。[94]

钙、镁的测定使用EDTA滴定法；具体技算方法如下：

$$\text{土壤中} Ca^{2+}\% = \frac{V_1 \times M \times 2}{V} \times 100 \times \frac{Ca}{2000} \times \frac{\text{水}}{\text{土}}$$

$$\text{土壤中} Mg^{2+}\% = \frac{(V_2 - V_1) \times M \times 2}{V} \times 100 \times \frac{Mg}{2000} \times \frac{\text{水}}{\text{土}}$$

式中：V_1——滴定Ca^{2+}时所用的EDTA ml数

V_2——滴定Ca^{2+}、Mg^{2+}含量时所用的EDTA ml数

M——EDTA ml数的克分子浓度

V——吸取土壤浸出液的体积

2——为克分子浓度换算为当量浓度的系数[94]

钾的测定使用火焰光度法；具体技算方法如下：

$$\text{土壤中K\%或Na\%} = \text{待测液ppm（K或Na）} \times \frac{50}{V} \times \frac{\text{水}}{\text{土}} \times 10^{-4}$$

式中：V——吸取待测液ml数
水样中K的含量（ppm）=待测液的ppm×50/V[94]

碳酸根和碳酸氢根测定使用双指示剂－中和滴定法，具体方法如下：

$$\text{土壤中}CO_3^{2-}\text{含量（me/100g土）}=\frac{2V_1\times N}{V}\times\frac{\text{水}}{\text{土}}\times 100$$

$$\text{土壤}CO_3^{2-}\text{含量（\%）}=\text{土壤}CO_3^{2-}\text{me/100g}\times 0.0300$$

$$\text{土壤中}HCO_3^{-}\text{含量（me/100g土）}=\frac{(V_2-2V_1)N}{V}\times\frac{\text{水}}{\text{土}}\times 100$$

$$\text{土壤}HCO_3^{-}\text{含量\%}=\text{土壤}HCO_3^{-}\text{me/100g}\times 0.0610$$

式中：V_1——酚酞指示剂达到终点消耗的H2 SO_4^{2-}ml数
V_2——溴酚蓝为指示剂达到终点时消耗的H_2 SO_4^{2-}ml数
N——H_2 SO_4^{2-}标准溶液的当量
V——滴定时吸取浸出液或水样的体积（ml数）[94]

硫酸根的测定使用EDTA间接络合滴定法，具体方法如下：

$$\text{土壤}SO_4^{2-}\text{（me/100g土）}=\frac{2M\ (V_2+V_3-V_1)}{V}\times\frac{\text{水}}{\text{土}}\times 100$$

$$SO_4^{2-}\%=SO_4^{2-}\ \text{（me/100g土）}\times 0.0480$$

式中：V——吸取待测液ml数
V_1——待测液中原有Ca^{2+}、Mg^{2+}以及SO_4^{2-}作用后剩余钡镁剂所消耗得总EDTA溶液的ml 数
V_2——钡镁剂（空白标定）所消耗的EDTA溶液的ml数
V_3——同等体积待测液中所有Ca^{2+}、Mg^{2+}所消耗的EDTA溶液的ml数
M——EDTA标准溶液的摩尔浓度，折合SO_4^{2-}的当量浓度时须乘2。
0.048——SO_4^{2-}的毫当量（g）[94].

土壤含水量的测定采用铝盒取样烘干秤重法求出，具体方法如下：

$$\frac{W_1-W_2}{W_2-W}\times 100\%=\text{土壤含水量（\%）}$$

式中W_1为烘干前的重量，W_2为烘干后的重量。W为吕盒的重量[94]。
沙粒径的测定由石河子大学化工学院代为测定。

3.3 数据处理

根据本研究的特点，以物种的重要值来反映种的特征。对于乔灌层重要值采用：
重要值(%) = (相对多度+相对盖度+相对高度)/ 300
草本层重要值采用：重要值(%) = (相对多度+相对盖度)/ 200

$$相对多度=\frac{某个种的多度}{所有种多度之和}\times 100$$

$$相对高度=\frac{某个种的平均高度}{所有种平均高度之和}\times 100$$

$$相对盖度=\frac{某个种的盖度}{所有种盖度之和}\times 100$$

3.4 数据分析

采用 WinTWINS 软件包中[139]设计的 TWINSPAN 进行群落分类，Braak C. J. F. Ter[128]设计的 CANOCA 软件包标准程序中的 DCA 和 CCA 进行排序。
数据的分析用 Photoshop cs3、Eexcel 和 Spass 软件完成。

3.5 结果与讨论

表 3-1 研究区内统计到的物种名录

Tab3-1 species in three sites of study area

序号	物种名	序号	物种名
1	白梭梭 *Haloxylon persicum*	16	簇花芹 *Soranthus meyeri*
2	白皮沙拐枣 *Calligonum leucocladum*	17	新疆紫罗兰 *Matthiola stoddarti*
3	羽毛三芒草 *Aristida pennata*	18	螺喙芥 *Spirorhynchus sabulosus*
4	心叶驼绒藜 *Ceratoides ewersmanniana*	19	蓝刺头 *Echinops gmelinii*
5	沙蓬 *Agriophylum squarrosum*	20	沙生千里光 *Senecio subdentatus*
6	虫实 *Corispermum lehmannianum*	21	假狼紫草 *Nonea capsica*
7	对节刺 *Horaninowia ulicina*	22	东方旱麦草 *Ermonphyrum orientale*
8	角果藜 *Ceratocarpus arenarius*	23	齿稃草 *Schismus arabicus*
9	长翅猪毛菜 *Salsola paulsenii*	24	小花荆芥 *Nepeta micrantha*
10	硫包菊 *Hyalea pulchella*	25	沙大戟 *Chrozophora sabolusa*
11	沙漠绢蒿 *Seriphidium santolium*	26	尖喙牻牛儿苗 *Erodium oxyrrhynchum*
12	补血草 *Limonium mill*	27	小花天荠菜 *Heliotropium micranthum*
13	叉毛蓬 *Petrosimonia srbirica*	28	四齿芥 *Tetracme quadricornis*
14	粗柄独尾草 *Eremurus inderiensis*	29	螺喙芥 *Cancrinia discoidea*
15	异翅独尾草 *Eremurus anisopterus*	30	硬萼软紫草 *Arnbia decumbens*

3.4.1 TWINSPAN 分类分析

现地调查表明，调查区以低矮的灌木、半灌木荒漠植被为主，除了短命植物和一年生植物以外，几乎全为旱生、超旱生植物，三个调查样地中藜科植物出现频数最高，显示了植被的荒漠化特征。采用 TWINSPAN 将 42 个样方分类,依据 5 中国植被 6 的分类系统[95]总结前人已有的研究[96]并结合野外调查结果和群落特征,对分类结果做了一些调整,最后将三个样地 42 个样方划分为 5 个群丛，它们分别是

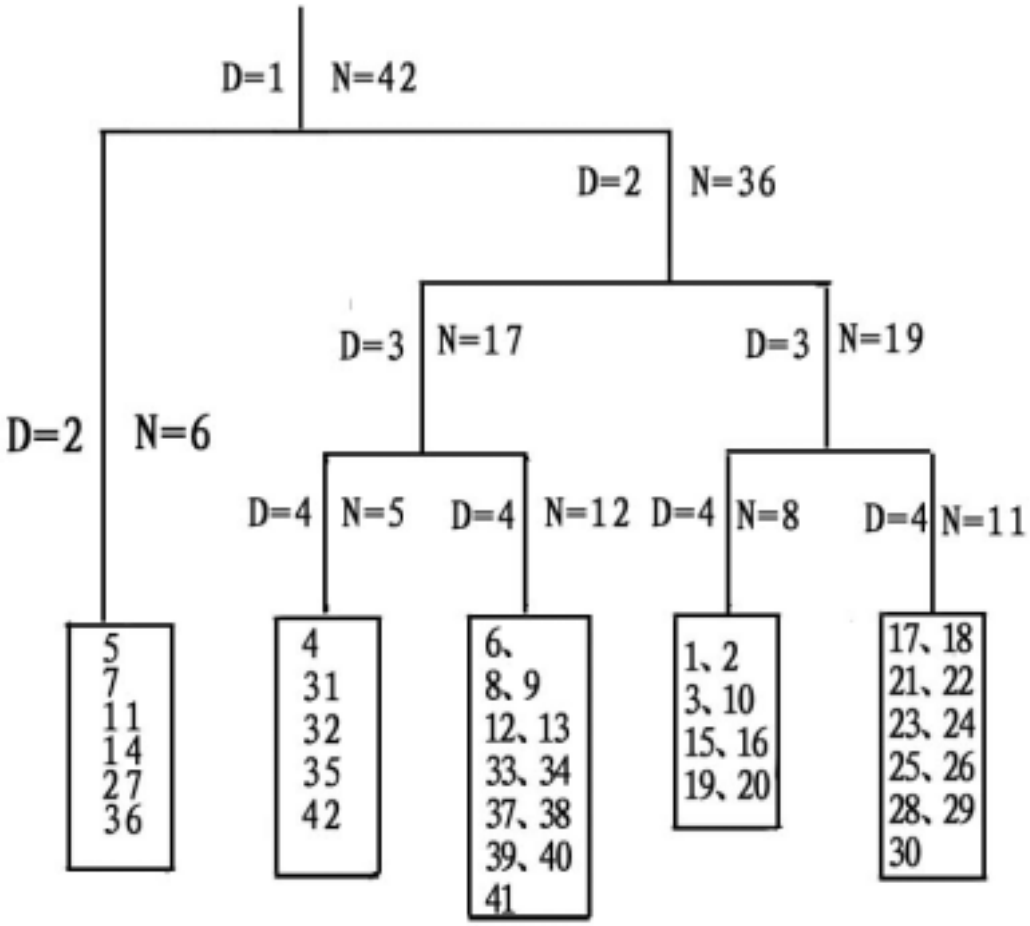

图 3-2　42 个样方的 TWINSPAN 分类树状图

Fig. 3-2　Dendrogram of the TWINSPAN classification of 42 samples in the study aera

N 代表样方数:D 代表第 k 次分类 N: sample number, D: division number

1）虫实—异翅独草群丛 （*Ass. Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius*）包含样方 6、8、9、12、13、33、34、37、38、39、40、41。虫实为一年生长营养期植物，异翅独尾草为一年生早春类短命植物，在沙丘上的分布较广，主要分布于沙丘的中下部，倾向于分布于被风面，坡度小于 40 度。虫实盖度最高可达 12%，异翅独尾草小于 1.8%。干旱和风蚀的忍耐能力相对较低，主要分布于 147 团和 150 团样地。伴生种有羽毛三芒草、小花荆芥、沙大戟、假狼紫草等，羽毛三芒草盖度为 2%。小花荆芥、沙大戟、假狼紫草等的盖度均小于 0.8%。

2）长翅猪毛菜群丛（*Ass.Salsola paulsenii*）

包含样方 4、31、32、35、42。长翅猪毛菜为一年生长营养期植物。主要分布于沙丘中下部，倾向于生长在迎风面，耐风蚀和干旱能力强，坡度小于 35 度。盖度最高可

达到 8%，主要分布于 149 团样地。伴生种有对硬萼软紫草，节刺、螺喙芥、四齿芥、小甘菊等。对节刺。硬萼软紫草和螺喙芥的盖度小于 0.8%，四齿芥和小甘菊为稀有种。

3）白梭梭—白皮沙拐枣群丛(*Ass.Calligonum leucocladum—Haloxylon persicum*)

包含样方 5、7、11、14、27、36。白梭梭为多年生大灌木，高度为 1—2.5m，盖度为 10%，多生长于沙丘中上和顶部，倾向于分布于被风面，耐风蚀和干旱。沙拐枣为多年生小灌木。高度为小于 1m，盖度为 8%，多生长于沙丘中下部，耐风蚀，坡度小于 40 度，主要分布于 149 团和 150 团样地。伴生种有沙生千里光、东方旱麦草、硬萼软紫草、尖喙牻牛儿苗、叉毛蓬。沙生千里光的盖度小于 0.5%。东方旱麦草的盖度为 0.7%左右。和尖喙牻牛儿苗的盖度小于 0.3%。叉毛蓬为稀有种。

4）沙蓬—角果藜群丛（*Ass.Agriophylum squarrosum—Ceratocarpus arenarius*）

包含样方 1、2、3、10、15、16、19、20。沙蓬和角果藜皆为一年生长营养期植物，坡度小于 35 度。沙蓬盖度为 3%左右，角果藜盖度最高可达 5%，主要分布于 147 团样地。伴生种有小花天荠菜、簇花芹、硫包菊，均为稀有种。

5）沙漠绢蒿—心叶驼绒藜 —补血草群丛（*Ass.Seriphidium santolium—Ceratoides ewersmanniana—Limonium mill*）

包含样方 17、18、21、22、23、24、25、26、28、29、30。沙漠绢蒿为一年生长营期植物，盖度为 8%，心叶驼绒藜为多年生小灌木高度 0.3—0.5m，盖度为 5%。补血草为一年生长营养期植物，盖度为 4.2%、沙漠绢蒿和心叶驼绒藜生长于沙丘中下部，耐干旱，补血草只生长于沙丘下部或平地，主要分布于 147 团样地。伴生种有齿稃草、蓝刺头。齿稃草的盖度为 0.4%。蓝刺头为稀有种。

虽然 TWINSPAN 只对物种和样方进行分类，不涉及环境因子。但 TWINSPAN 把相关性较大的样方和物种进行了分组，把物种和样方按照不同的样地进行了划分。比如长翅猪毛菜群丛大致位于 149 团样地；虫实—异翅独尾草群丛主要分布于 150 团和 147 团样地；沙漠绢蒿—心叶驼绒藜—补血草群丛大部分只在 147 团样地内存在。物种分布体现了局部环境差异，同时在较大的空间尺度上也体现了三个样地环境差异。大量数据显示地貌和土壤理化性质构成的该沙漠微生境尽管存在着异质性 ,但其空间上的变化梯度较小。而沙漠植物中一些优势种 ,如白梭梭、白皮沙拐枣等属于生态幅较宽的物种,加之该地区绝大多数短命植物在生理学和解剖学上表现出的强烈中生性特征[97],使得这些植物种在古尔班通古特沙漠较小的微生境变化梯度中难以形成清晰的空间群落组合。因此造成一些样地之间样方的交叉。

3.4.2 DCA 分析

去掉重要值很小的物种和稀有物种，本文利用三个样地 42 个样方 15 个物种的重要值进行 DCA 排序，得到的 DCA 排序图。

表 3-2 DCA 分析的特征值、梯度的长度以及物种数据的累积解释量

Table 3-2 Eigenvalues, lengths of gradient, cumulative variances of species data of DCA ordination

排序轴	特征值	梯度的长度	物种数据的累积解释量
Axes	Eigenvalues	Lengths of gradient	Cumulative percentage variance of species data
1	0.709	3.252	32.6

2	0.342	2.894	48.3
3	0.137	2.027	54.6
4	0.054	1.436	57.1

DCA 分析得到前四轴的物种和环境累积解释量分别为 32.6、48.3、54.6 和 57.1。第一轴和第二轴的特征值为 0.709 和 0.342。 排序效果比较理想[98]结合分类所得的各群落分类结果,可以看出排序结果在二维排序图上有各自比较明确的分布范围和界限,这说明 DCA 分析同分类结合,其结果能较好地反映了植物群落之间以及群落与环境之间的生态关系。

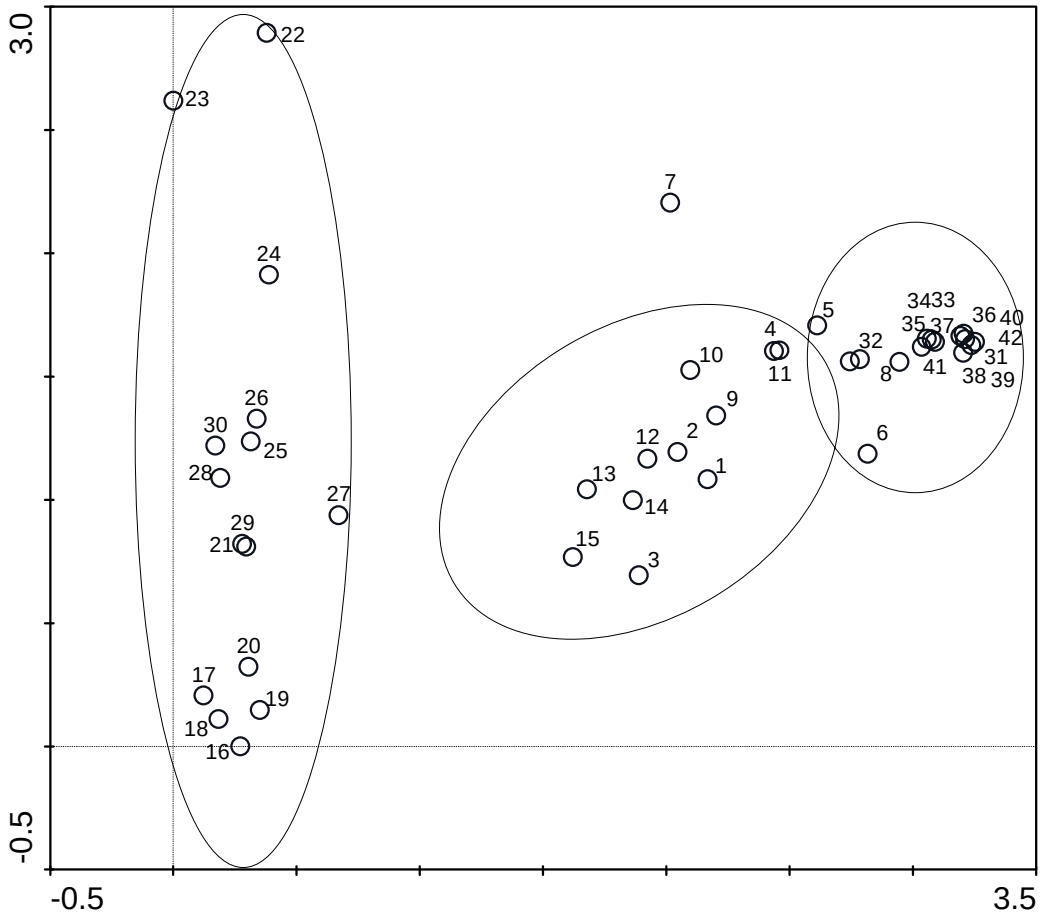

图 3-3 42 个样方的 DCA 二维排序图

Fig.3-3 Two dimensional DCA ordination diagram of 42 samples around study area

数字 1—15 表示 150 团样地的样方 ;16—30 表示 147 团样地的样方 ;31—42 表示 149 团样地的样方。

从排序图上可以看出，样地样方之间的界限明显，在排序图上呈现出不同的聚集程度，聚集程度越高，说明样方之间的环境差异越小。149 团样地的样方聚集程度最高，大部分样方出现了重叠，说明样地样方之间的环境差异最小。而 147 团样地样方在排序轴 2 方向上比较分散，说明样方之间在该轴所表示的环境梯度差异较大。150 团样地样

方之间的聚集程度在两排序轴方向上都表现得较为分散，说明 150 团样地样方间环境差异较大且表现复杂。从图上还可看出 150 团样地样方和 149 团样地样方在排序图上的位置较近，某些样方如 6、8 和 32 还出现了交叉。说明 149 团样地和 150 团样地的环境差异相对较小。排序轴代表了某种环境因子，从两排序轴方向上看，三个样地样方的分布和排序轴存在某种明显的线性关系。DCA 排序不涉及环境因子，所以不能断定排序轴所代表的环境因子。

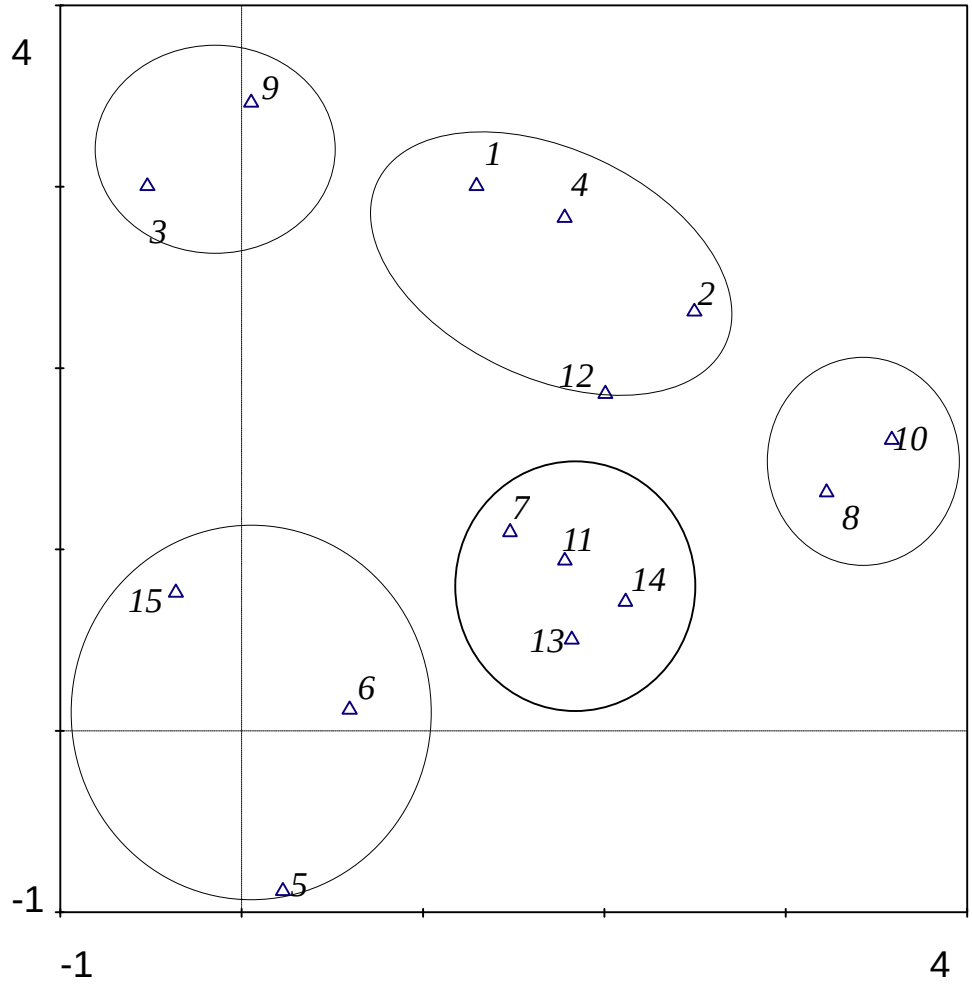

图 3-4 研究区内主要物种的 DCA 二维排序图

Fig.3-4 Two dimensional DCA ordination diagram of the key species around study area

1 异翅独尾草 *Erasures anisopterus*
2 小花天荠菜 *Heliotropium micranthum*
3 长翅猪毛菜 *Salsola paulsenii*
4 虫实 *Corispermum lehmannianum*
5 补血草 *Limonium mill*
6 沙漠绢蒿 *Seriphidium santolium*
7 沙生千里光 *Senecio subdentatus*
8 沙蓬 *Agriophylum squarrosum*
9 硬萼软紫草 *Arnbia decumbens*
10 角果藜 *Ceratocarpus arenarius*
11 东方旱麦草 *Ermonphyrum orentale*
12 羽毛三芒草 *Aristida pennata*
13 白梭梭 *Haloxylon persicum*
14 白皮沙拐 *Calligonum leucocladum*
15 心叶驼绒藜 *Ceratoides ewersmanniana*

物种分布的 DCA 排序图中的分布表明物种之间的相关性，物种之间的位置越近，相关性越高。TWINSPAN 分类的各群丛的相关物种在 DCA 排序图中表现出较高的相关性。说明 DCA 排序与 TWINSPAN 分类的结果具有较高可信度。样方之间的环境差异必然导致植被分布的差异。在 DCA 排序图中，没有一种类型的群落在排序轴方向有较大跨度，可见各群落类型之间存在生态位差异。虫实—异翅独尾草群丛主要分布于 150 团和 147 团样地。该群丛属于环境依赖型，一般生长的较稳定的环境，对沙面稳定的意义不大。长翅猪毛菜群丛主要分布于 149 团样地。该群丛对干旱的忍耐较强，在一定的区域能形成一定的覆盖度，但是耐风蚀的能力相对较弱。白梭梭—白皮沙拐枣群分布于 150 团和 149 团样地。该群丛的耐旱和耐风蚀能力都较强，属于掩体的先锋物种，对沙漠的稳定具有重要意义。沙蓬—角果藜群丛和沙漠绢蒿—心叶驼绒藜—补血草群丛主要分布于 147 团样地。沙蓬—角果藜群丛耐旱和耐风蚀能力都较强，属于掩体的先锋物种，如果但是植株一般矮小，高覆盖度对于保护沙面有重要意义，但对于降低风俗意义不大。沙漠绢蒿—心叶驼绒藜—补血草群丛在盖度和高度上能形成比较合理的组合。补血草和绢蒿能形成有效的盖度，而驼绒藜具备一定的高度。该组合能有效降低风速和减小风蚀。

很多研究[99~101]证明：将 TWINSPAN 分类和 DCA 排序结合。两者所得的结果可以相互补充，得到比较理想的群落分类结果。结果证明，TWINSPAN 分类和 DCA 排序和能很好的反映物种在样方中的分布，以及物种和样方分布与环境因子之间的关系。

小结：TWINSPAN 分类和 DCA 排序结果表明，三个样地的物种组成和分布都有差异，各个样地存在不同的群落类型。植被因素是对沙面稳定的重要积极因素。植被的高度、覆盖度、密度、聚集方式、群落组成等都是影响风动强度的条件[70~77]。因此了解植被的群落类型对于沙面稳定的评价具有重要的意义。从植被的角度来看，147 团样地的植被分布和组成对于沙面的稳定最有利。149 团样地植物丰富度最低，密度也最小，物种组成对于沙面稳定意义也不理想。而 150 团样地虽然物种丰富比较高，但分布不均匀，沙垄中山部沙面活动依然很剧烈。但相较 149 团样地稍好。此外，物种的分布同时也体现了环境的差异，这两者之间的关系也是评价沙漠植被生态稳定性的重要方面。

3.4.3 CCA 分析

利用三个样地的 15 个物种的重要值和 12 个环境因子进行 CCA 排序。

表 3-3 CCA 分析的特征值、梯度的长度、物种以及物种和环境数据的累积解释量

Table 3-2 Eigenvalues, lengths of gradient, cumulative variances of species and species – environment data of CCA ordination

排序轴	特征值	梯度的长度	物种累积解释量	物种-环境关系累积解释量
Axes	Eigenvalues	Species-environment correlations	Cumulative species percentage variance of data	Cumulative percentage variance of species-environment

				relation
1	0.615	0.936	28.3	44
2	0.303	0.871	42.2	65.7
3	0.215	0.912	52.1	81.1
4	0.124	0.822	57.8	90

如表，排序轴 AX1 和 AX2 的特征值和物种环境解释量分别为 0.615、0.936、44、65.7。排序结果能够较真实的反映植物分布与环境的关系。

CCA 排序能同时对物种和环境因子以及样方和环境因子进行分析，图中箭头代表各个环境因子，箭头所处象限代表环境因子与排序轴间的正负相关性，箭头连线长短代表植物群落分布与该环境因子相关性的大小，连线越长，相关性越大，连线越短，相关性越小;箭头连线与排序轴的夹角大小表示该环境因子与排序轴相关性大小，夹角越小，相关性越高，夹角越大，相关性越小[102]。

表 3-4 环境因子以及排序轴之间的相关性分析

Table 3-4 Correlation coefficient between environmental factors and the first two axes of CCA ordination

	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2	SW	SV	ACP
SW	0.5811*	-0.1967	0.6205*	-0.2259	1		
SV	0.6356*	0.1929	0.6787*	0.2215	0.0261	1	
ACP	0.6026*	0.1441	0.6434*	0.1655	0.3205	0.241	1
OM	0.5846*	-0.1784	0.6243*	-0.2048	0.8372**	-0.0023	-0.4071
CO_3^{2-}	-0.0415	0.0189	-0.0443	0.0217	0.1038	-0.0741	0.2591
HCO_3^-	-0.4065	-0.0562	-0.4341	-0.0646	0.0992**	-0.5189*	-0.1794
Ca^{2+}	-0.5754*	0.233	-0.6144*	0.2675	-0.6423*	-0.2529	-0.2661
Mg^{2+}	0.1076	0.0735	0.1149	0.0844	0.0829**	0.0654*	-0.0066
SO_4^{2-}	0.491	-0.1255	0.5244*	-0.1441	-0.1576	0.0469	0.6448*
SS	0.4868	0.1293	0.5198*	0.1484	-0.0382	0.2893	0.6599*
SLO	0.0416	-0.7211**	0.0444	-0.828**	**-0.5526***	-0.1364	0.0294
SP	0.1174	0.3959	0.1254	0.4546	**-0.654***	0.2085	0.2654

	OM	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	SS	SLO
OM	1							
$CO3^{2-}$	0.0739	1						
HCO_3^-	0.0672	-0.0495	1					
Ca^{2+}	-0.75	-0.0938	0.1214	1				
Mg^{2+}	0.1556	-0.0014	-0.0466	-0.1161	1			
SO_4^{2-}	0.7349**	0.3352	-0.0212	-0.6297*	0.0968	1		
SS	-0.0882	-0.0094	-0.3899	-0.1255	-0.0591	0.1079	1	
SLO	0.0964	-0.1665	0.0654	-0.0543	-0.1849	-0.0594	-0.2126	1
SP	**-0.5128**	0.1932	0.0088	0.2503	-0.0489	-0.0585	**0.5319**	-0.312

*P<0.05 **P<0.01

注：SW 、SV、 ACP、 OM 、SS 、SLO 、SP 分别代表土壤含水量、输沙量、蚀积量、土壤有机质、沙

粒径、坡度、坡位。

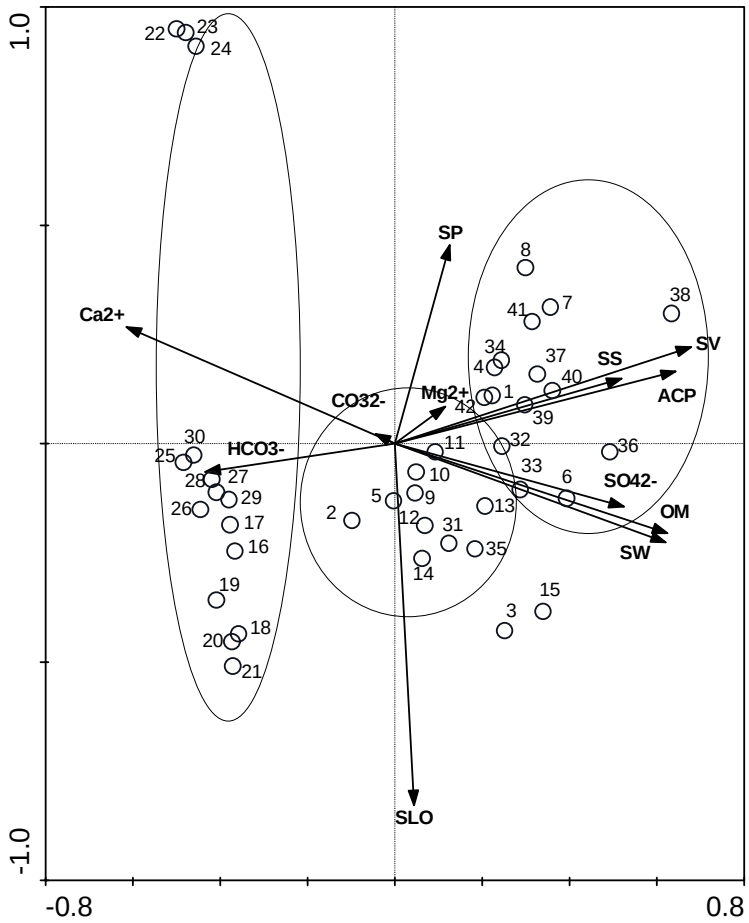

图 3-5 42 个样方和环境的 CCA 二维排序图

Fig.3-5 Two dimensional CCA ordination diagram of 42 samples and environments around study area

CCA 排序图中样方分布较 DCA 排序分散。但各样地的样方在排序图上分布的大概位置不变：149 团样方主要分布于第一象限，150 团样方主要分布于第二象限，而 147 团样方则主要位于第三象限。但 147 团样地样方仍然集中于排序图右下方。150 团样方和 149 团样方存在很多交叉，原因是分类是把群落的分布认为是间断的，而排序认为群落的分布是连续的，在这两点上，两者发生了矛盾。但是，我们可以认为重叠的部分是群落的过渡类型[103]。DCA 排序的特征值也高于 CCA,这说明，CCA 排序在在描述样地(群落)间关系上不如 DCA 排序。但是从样方和物种分布及聚集的情况来看，CCA 排序及 TWINSPAN 分类的结果吻合。

从环境因子与排序轴的相关性看，AX1 与土壤含水量、输沙量、蚀积量、土壤有机质以及钙离子含量呈现显著相关。说明样方沿 AX1 的分布格局是这几个因子的综合作用。而 AX2 与坡度变化呈现极显著相关，说明沿样方在 AX2 方向上的分布格局主要受坡度影响。

沿 AX1 方向，147 团样地样方分布在排序轴上的跨度很小，因此，147 团样方之间土壤含水量、输沙量、蚀积量、以及钙离子含量这几个因子的差异很小。虽然 147 团样地沙丘高度比 149 团样地高，风力对沙丘的作用也相对强烈，但由于 147 团样地两坡坡

度也比较接近，两坡植被盖度较高，分布也比较均匀，沙面相对比较稳定。所以两坡输沙量和蚀积量、土壤有机质等土壤因子相对比较稳定。样方 22、23、24 与其他样方相距较远，且三个样方聚集在一起。说明这三个样方环境极为相似，与其他样方环境存在很大差异，是因为这三个样方刚好处于丘顶顶部流动带，此处土壤基质不稳定，所以在 CCA 排序图上表现出样地内的这种分离。150 团样方点在 AX1 方向上较分散。说明 150 团样地土壤含水量、输沙量、蚀积量、土壤有机质以及钙离子含量等因子差异比较大。150 团样地沙丘高度较高，两坡坡度差异也比较大。地形比较复杂，植被分布不均匀，两坡受到风沙扰动的差异也比较大。这是造成其土壤因子差异的主要原因。所以 150 团样地的样方分布比较分散。相对来看，149 团样地环境比 150 团样地差异小，样方点比 150 团集中。但样方群在 CCA 排序图中还是可以被明显区分。149 团样地沙丘高度和坡度都比较小，沙粒径比较大，持水能力弱，且由于油田开发，人为因素对环境的影响大，扩大了样地内样方的环境差异，这些是造成 150 团样方分布格局的原因。

坡位和坡度与 AX2 的相关系数比较大，因此我们认为各样地样方在 AX2 方向上分布主要受限于坡位和坡度的共同作用。147 团样地样方分布在 AX2 方向上分布跨度较大，这是由沙丘的高度和坡度所决定的。由于 150 团沙丘高度比较高，两坡差异大，所以样方在 AX2 方向上的分布的跨度较大。其在 AX2 方向上的跨度就相对较小。150 团沙丘高度最高，给环境差异的形成提供了较大的空间，又由于坡位决定了两坡受风沙干扰的程度差异，植被分布、结皮覆盖、地形等因素，增加了样方点之间的环境差异，从而增加了样方点分布的不可确定性。这些都决定了 150 团样方之间环境因子的较大差距。因此 150 团样地的物种丰富度也是三个样地最高的，但由于高坡度也使得沙丘中上部分受到了较高的风蚀。基质不稳定。与沙丘底部形成鲜明的对比。而 147 团样地沙丘高度适中，坡位间的环境差异相对较小。能够抵挡风蚀又便于形成比较一致的植被。149 样地比较平坦，坡度很小，坡度起不了降低风速的作用，地表在持续的风蚀下，植物很难大量发生。只有像梭梭沙蓬一类耐风蚀的植物能生存。植被对沙面稳定的贡献也不高。

物种分布受限于环境因子。在物种与环境的 CCA 二维排序图中，物种分布于 DCA 排序有所差异。但是样方与物种分布的关系在 CCA 和 DCA 排序图上表现相似，说明 CCA 排序也能在一定程度上反映物种与样方之间的关系。由此可见，沙丘的高度与沙面的稳定性有很大关系。沙丘太高或者太低都不利于沙面的稳定。这种关系有待研究，但沙丘高度和坡度对水分分布和沙粒径的垂直分布的影响是明显的，而这些又都是影响沙面稳定的积极因素。所以沙丘的高度和坡度是通过直接和间接的方式影响沙面的稳定性。

从 AX1 的方向上看三个样地群落的分布，可以看出沙蓬—角果藜群丛与各环境因子相关系数都很小，说明其对环境的依赖性很小。沙漠绢蒿—心叶驼绒藜—补血草群丛在 AX1 方向上的差异很小，说明土壤含水量、以及钙离子等因子不是造成这两个群落分布的主要原因。土壤基质的稳定和种子的散布可能是影响其分布主要原因。长翅猪毛菜群丛位于 CCA 排序图的第三象限，其分布与输沙量、蚀积量、沙粒径呈负相关，说明该群丛耐风蚀、耐旱能力都相对较弱，主要分布于沙丘的中下部。白梭梭—白皮沙拐枣群丛的分布于输沙量、蚀积量、沙粒径正相关，说明该群落主要分布于沙面活动比较强烈的环境。此外，有机质、土壤水分、SO_4^{2-}也是影响其分布的因子，但作用相对较弱。而虫实—异翅独尾草群丛处于排序图的正中偏上，说明该群丛对环境的依赖较小，属于分布比较广泛的群落。

从 AX2 的方向上看三个样地群落的分布，可以看出沙蓬—角果藜群丛在排序图上位于第四象限。根据我们对坡位赋值的意义，（1、4 象限是迎风坡，2、3 象限是背风坡）

该群丛主要分布于沙丘的迎风坡，在 AX2 方向上跨度较大，说明该群丛在坡位和坡度上的分布范围比较广，对环境因子的依赖很低，生态幅相对较宽，在三个样地均有分布。是沙丘植被演替的先锋物种。沙漠绢蒿—心叶驼绒藜 —补血草群丛在 AX2 方向上的差异很小，说明土壤含水量、输沙量、蚀积量、以及钙离子等因子不是造成该群落分布的主要原因。主要分布于 147 团样地的背风面，坡位跨度较大。147 团样地土壤因子在两坡的差异较小，该群丛的分布可能与种子的散布和集中分布有关[104]。

长翅猪毛菜群丛位于 CCA 排序图的第三象限，CCA 排序图显示该群丛主要分布于 149 团样地的背风坡的中下部，分布比较集中。但实际中，该群丛物种分布比较广，两坡差异不明显，环境依赖也比较小。由于我们去除了很多多度和盖度很小的物种，所以在排序图上可能造成了样方之间跨度减小和集中。白梭梭—白皮沙拐枣群丛分布于沙丘的迎风面的中山部，主要分布于 149 团和 150 团样地。实际调查结果显示，该群丛在 149 团样地分布在坡度和坡位上的差异很小，分布比较均匀。149 团样地沙丘高度很小，坡度差异不明显是主要原因。可见，白梭梭—白皮沙拐枣群丛分布与坡度和坡位有较大相关性，对风蚀和沙蚀有很高的抵抗能力。对沙沙面的稳定有很高的贡献。

小结：综上所述，TWINSPAN 将 42 个样方 30 个物种分为五个不同群从。DCA 排序表明了样方与物种之间的关系以及不同群落与样地的关系。物种或群落对环境的选择导致物种和群落在三个样地的分布差异。DCA 排序结果与分类结果吻合，并验证了分类的结果。

CCA 排序表明了样方与环境因子以及群落与环境因子的关系。以及样地间环境差异的程度。由于三个样地环境因子的差异使样方在两排序轴方向呈现出不同的分布方式，但在排序图中能明显区分不同样地的样方。说明三个样地环境差异比较明显。从 147 团和 150 团样地的植物分布规律来看。沙丘顶部小生境限制性最强，沙面没有完全稳定，使能够生存植物的种类、数量、盖度最少，植物的耐旱性相对最强。沙丘底部小生境相对最好，沙面比较固定，使能够生存植物的种类、数量最多，而且盖度最大，生长的植物给水条件最好。中部处于两者中间。150 团样地沙丘高度较高，走向相对不一致，加上风沙的蚀积。使得沿坡方向环境差异较大，且表现复杂。从而有利于不同耐旱植被的生存和生长，这对了解沙漠地区固定沙丘的植被环境关系有着非常重要的意义。147 团沙丘高度较 150 团低，受风沙影响较小，两坡沿坡环境差异较小，环境相对稳定，植物丰富度较低，但生物量却比较大。149 团样地沙丘高度最低，两坡环境差异更小，物种更加单一。可见沙丘高度在影响沙丘环境差异上具有重要作用，对植被分布具有重要影响。

坡位和坡度与 AX2 的相关系数比较大，三个样地样方在 AX2 方向上呈现出不同程度的聚集，说明坡度和坡度对样方的分布有重要的作用。相关性分析中，坡位和坡度与土壤含水量的相关系数分别为-0.654 和-0.552。坡位与有机质含量和沙粒径的相关系数分别为-0.5128 和 0.5319。表明了土壤含水量和土壤有机质随着沙丘高度的升高而减小。沙粒径随着沙丘高度升高细沙含量升高。而土壤含水量和土壤有机质是影响植物分布的重要因素。而粒径的垂直分布也是影响水分分布和土壤表面稳定的重要因素。而坡位和坡度受限于沙丘高度，因此，沙丘的高度直接或间接的影响了沙面的环境，进而影响了植物在各样地的组成和在沙面的分布，并进一步影响沙面的稳定性。

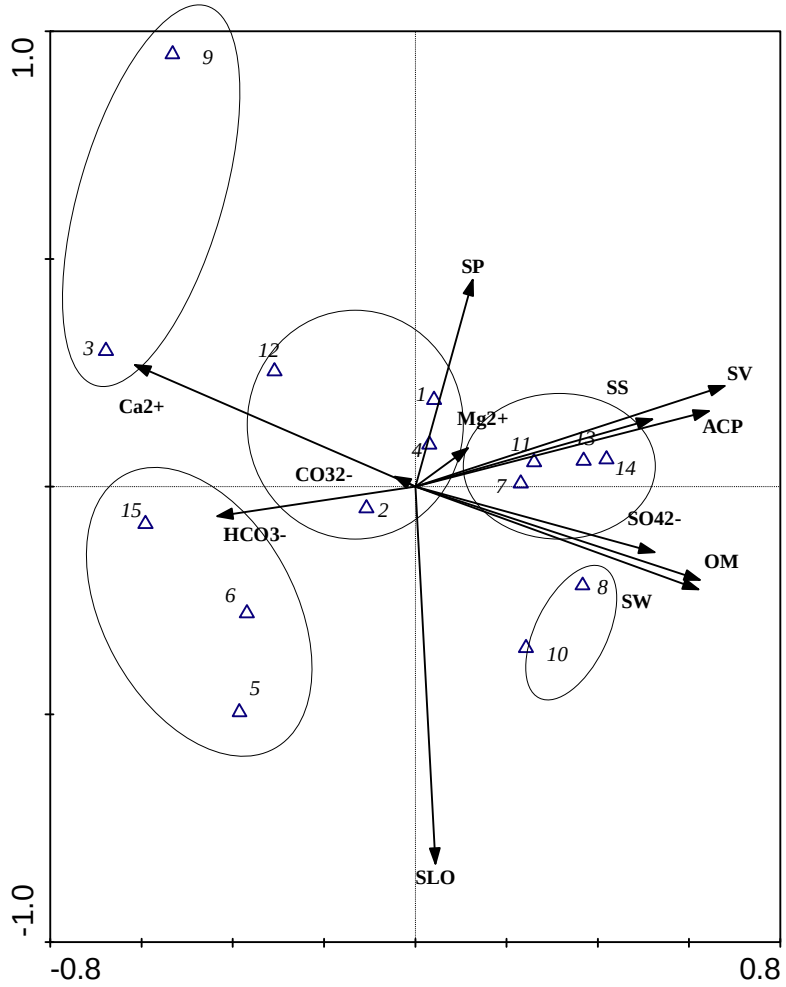

图 3-6 研究区内主要物种和环境的 CCA 二维排序图

Fig.3-3 Two dimensional CCA ordination diagram of the key species and environments around study area

第四章 沙面稳定性分析

4.1 分析方法介绍

根据以往文献中提到的多样性指数的选取[105~107]本文选取物种丰富度、多样性指数和均匀度指数对莫索湾地区植被群落的多样性进行对比，这些指数的计算方法如下：

一、丰富度指数

Patrick 指数：

D=S S=出现在样地的物种数 (1)

二、多样性指数：

辛普森(Simpson)指数： $D=\sum_{i=1}^{S}\left(\frac{N_i}{N}\right)^2$ （2）

香农-威纳(Shannon-wiener)指数： $H=-\sum_{i=1}^{S}\left(P_i \ln P_i\right)$ （3）

三、均匀度指数：

Pielou 指数： $E=\frac{H}{\ln(S)}$ （4）

修正的 Hill 指数： （5）

$$E=\left(\frac{1}{D_{simpson}}-1\right)\frac{1}{e^{H}-1}=\frac{N_2-1}{N_1-1}$$

公式中 Pi= Ni /N， Ni 为第 i 个种在每个基本样方中的个体数，N 为每个基本样方中所有种物种的个体数之和，S 为样方内的物种个数[35]。

如前所述，关于沙面的稳定性，很多学者从不同的角度进行了研究和诠释。根据本研究样地在空间上的跨度，我们认为气候因素对三个样地稳定性的影响是相同的。依据前人提到的影响沙面稳定的因子。本研究将从物种丰富度指数、物种多样性指数、物种均匀度指数、土壤含水量、盖度、沙粒径、地形等探讨影响沙面稳定的因素。并以输沙量、蚀积量两个个方面综合评价三个样地的沙面稳定的差异。

4.2 野外调查

4.2.1 盖度的测量

植被覆盖度测量的传统方法是地面测量，最简单的方法是目估法。由于使用此法对植被盖度进行估测时受主观影响较大，所以误差较大。近年来，数码相机的出现，使得植被覆盖度的地面测量更加方便、快捷且准确；

照相法实施时，平行于地面照相后，据相片估算植被覆盖度。此方法克服了其它常用地表测量植被覆盖度方法的人为主观性，精度高，稳定性好，野外用时少。但使用此方法时，需注意的是：照片边缘区域的形变较大为保证植被覆盖度测量的精度，测量时应去除边缘部分，只使用相片的中心区域[140] ，数码照片可以使用图像处理软件对植被覆盖进行像元解译，植被像元数占总像元数的百分比即为植被覆盖度。Anatoly [141]使用 KodakDC-40 数码相机对美国内布拉斯加州小麦植被覆盖度进行了估测。White[142]等比较了各种测量植被覆盖度技术，认为数码相机照相法是最容易、最可靠的验证遥感信息的技术。使用数码相机照相对植被覆盖度进行地面测量，目前已经成为一种趋势。

本研究对盖度的测量采用数码相机照相法，使用图像处理软件 Photoshop cs3 对植被覆盖进行像元解译，以植物像素数占总像素数的百分比作为为植物的覆盖度。

4.2.2 数据处理

为了便于比较，本研究将每个样方的沙粒分为四个等级，粗砂、中沙、细沙、粉砂。

它们的粒径分别为 2000～700μm、700～352μm、352μm～104μm、104～44μm。用每个样方中的粗砂和中沙所含的百分比除以细沙和粉砂的百分比所得的数值来比较每个样方沙粒径差异，数值越大说明沙粒径越大，数值越小说明沙粒径越小。数据的分析用 Excel 和 Spass 软件完成。

4.3 结果与讨论

4.3.1 物种丰富度、多样性和均匀度与沙面稳定的关系

表 4-1 三个样地不同坡位的物种丰富度、多样性和均匀度指数

Tab 4-1 the abundance、diversity、equality index of different slop positions of different study sites

		YD1	YD2	YD3	YZ1	YZ2	YZ3	D1	D2
	Patrick 指数	5.00	6.00	7.00	7.00	4.00	6.00	6.00	4.00
	Shannon-wiener 指数	1.07	0.84	1.03	0.99	0.68	1.29	1.51	0.75
147									
团	Simpson 指数	0.28	0.57	0.38	0.45	0.58	0.29	0.04	0.40
	Pielou 指数	0.66	0.47	0.53	0.51	0.49	0.72	0.84	0.54
	修正的 Hill 指数	1.37	0.57	0.89	0.71	0.75	0.91	6.42	1.31
	Patrick 指数	10.00	6.00	13.00	10.00	9.00	9.00	8.00	6.00
	Shannon-wiener 指数	0.69	1.66	2.15	1.37	1.43	1.29	0.63	0.77
150									
团	Simpson 指数	0.01	0.16	0.12	0.18	0.25	0.35	0.33	0.58
	Pielou 指数	0.26	0.65	0.93	0.70	0.62	0.72	0.31	0.35
	修正的 Hill 指数	0.95	1.24	1.00	1.54	0.93	0.70	2.32	0.63
	Patrick 指数	4.00	7.00	6.00	6.00	6.00	7.00	9.00	8.00
	Shannon-wiener 指数	0.29	0.89	0.57	0.60	0.43	0.34	0.47	0.31
149									
团	Simpson 指数	0.75	0.44	0.65	0.60	0.74	0.82	0.74	0.81
	Pielou 指数	0.21	0.46	0.32	0.34	0.24	0.17	0.22	0.15
	修正的 Hill 指数	0.97	0.87	0.70	0.80	0.67	0.56	0.58	0.64

		D3	BZ1	BZ2	BZ3	BD1	BD2	BD3
	Patrick 指数	5.00	6.00	7.00	7.00	4.00	6.00	6.00
	Shannon-wiener 指数	0.97	0.86	1.11	1.05	0.73	0.56	0.74
147 团	Simpson 指数	0.44	0.55	0.38	0.50	0.44	0.69	0.39
	Pielou 指数	0.60	0.39	0.48	0.50	0.45	0.31	0.41
	修正的 Hill 指数	0.77	0.60	0.81	0.54	1.19	0.58	1.41
	Patrick 指数	10.00	12.00	14.00	15.00	15.00	12.00	12.00

	Shannon-wiener 指数	1.07	1.67	1.22	1.81	1.99	1.61	1.67
150 团	Simpson 指数	0.46	0.13	0.34	0.18	0.12	0.14	0.15
	Pielou 指数	0.51	0.76	0.51	0.73	0.80	0.73	0.76
	修正的 Hill 指数	0.61	1.52	0.81	0.91	1.17	1.54	1.29
	Patrick 指数	5.00	7.00	9.00	8.00			
	Shannon-wiener 指数	0.27	0.46	0.76	0.47			
149 团	Simpson 指数	0.81	0.72	0.55	0.71			
	Pielou 指数	0.17	0.24	0.34	0.22			
	修正的 Hill 指数	0.78	0.64	0.72	0.70			

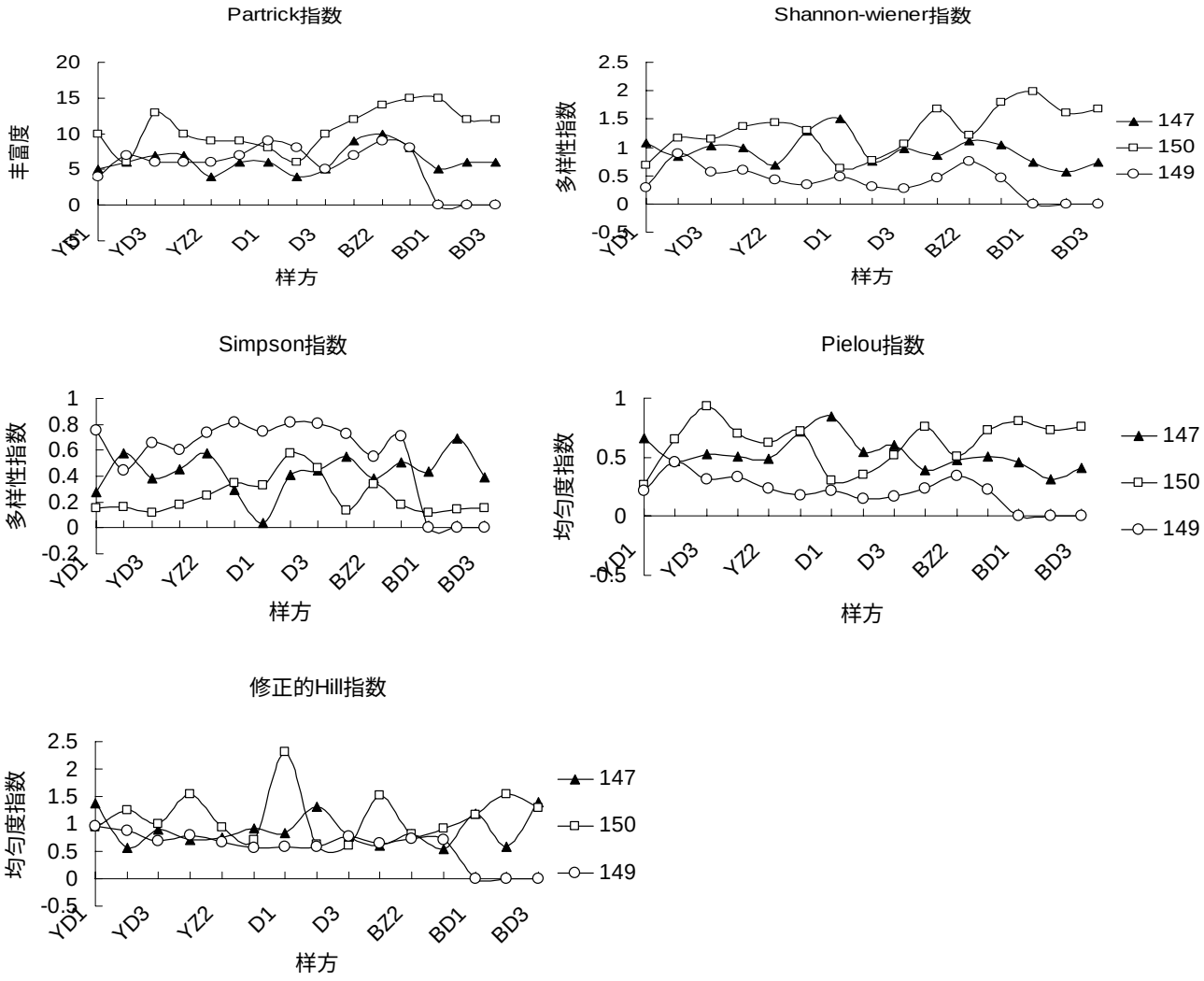

图 4-1 三个样地不同坡位的物种丰富度、多样性和均匀度指数走势图

Fig.4-1 the abundance、diversity、equality index of different slop positions of different study sites

注：YD、YZ、D、BZ、BD 分别分为迎风坡底部、迎风坡中部、顶部、背风坡中部、背风坡坡部。以下均同。

群落丰富度即群落物种数是最简单最古老的物种多样性测度指标，它是基于物种的存在与否，而不是物种的相对多度的一个多样性测度[102，107,142]。调查区在调查期内共有 30 种植物，与该地已有的调查结果相比[7]，物种数较少。从可以看出，150 团样地物种丰富度最高，单个样方达到 15 种，样方内平均为 10.73 种。其次是 147 团，样方内平均为 6.27 种。149 团样地的物种丰富度较 147 团稍低，样方内平均为 5.47 种。物种多样性是植被稳定的重要生态指标，古尔班通古特沙漠植被在干旱、盐碱、风蚀、沙埋等胁迫下，植被丰富度长期处于较低水平，且存在较大的时空差异。在 4 月中旬到 6 月初，在融雪水的作用下，大量短命植物短期内大量发生，增加了群落内的物种的多样性和盖度，但短命植物对水分依赖较大。本研究期间处于降水缺乏的年份，短命植物多样性很低，导致丰富度就会大大降低。但由于种子库的存在，是沙面稳定潜在积极因素。150 团样地较高的物种丰富度与其较高的沙丘高度有关，导致其沙垄迎风面和背风面以及不同坡位形成较大的环境差异，多样性的环境导致了高物种丰富度。物种的 Shannon-wiener 指数为 150 团最高，单个样方最大为 1.99。平均为 1.3。147 团次之，样方内平均为 0.94。149 团最低，样方内平均约为 0.4。而 Simpson 指数表明 149 团的物种多样性指数最高。与 Patrick 指数和 Shannon-wiener 指数的结果相反。这是由于 Simpson 指数增加了单个物种多度的权重，增加样方内某个物种的多度时，Simpson 指数也随之升高。如果样方数较少，物种多度在样方内差距很大。就算物种丰富度很低，也会造成 Simpson 指数很高。群落均匀度是表达物种多样性的另一个指标，在多样性指数相同的前提下，均匀度指数大的群落，物种的多样性高[102]。研究区各群落均匀度指数在 0.507～0.744 之间，均匀度还反映植被的分布格局。均匀分布能提供较大的沙面粗糙度，是稳定沙面的积极因素。物种的 Pielou 均匀度指数为 150 团最高，147 团次之，149 团最低。与 Patrick 指数和 Shannon-wiener 指数拟合较好。修正的 Hill 指数的结果与 Patrick 指数比较，降低了样方之间的区分。所以在本研究中，Patrick 指数的结果更为理想。通过以上指数的对比，150 团样地在物种丰富度，物种多样性和均匀性方面是最高的。147 团次之，149 团最低。虽然物种的丰富度不能直接对沙面的稳定产生贡献，但是它是群落其他参数稳定的基础。149 样地的物种比较单一，所以在均匀度和多样性上都处于较低水平。均匀度是植物分布的聚集程度的量度。均匀分布较集群分布更能降低风蚀的强度，是沙面的稳定的重要植被因素。由此可知，147 团样地的物种均匀度在三个样地中最高。是其沙面稳定的重要植被因素。

4.3.2 盖度与与沙面稳定的关系

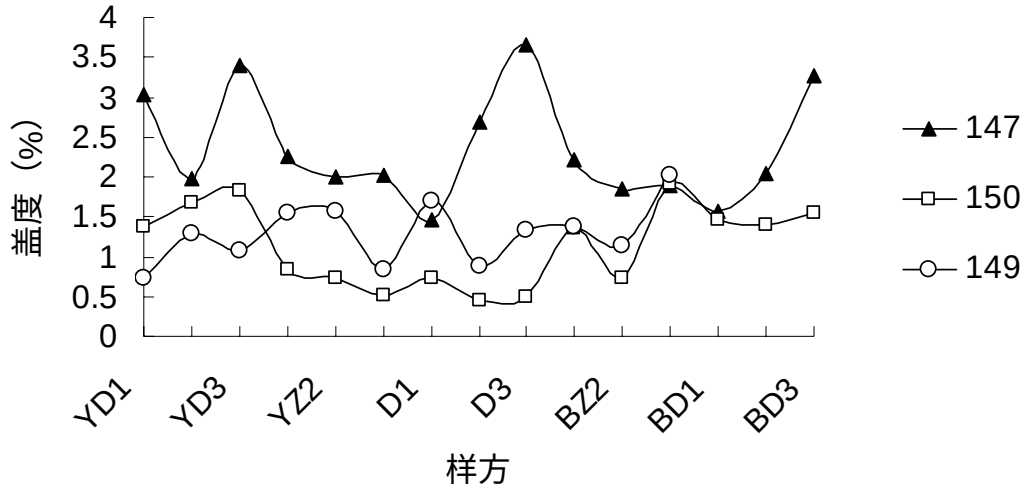

图 4-2 三个样地不同坡位的盖度走势

Fig.4-2 The line of coverage on different slop positions of different study sites

古尔班通古特沙漠南部处于复合型低能风环境中，冬季积雪和冻土可对地表形成有利的保护。夏秋季节没有积雪覆盖时，有效的植被覆盖是沙面整体处于稳定的重要因素[109]，通过对样地植被覆盖度调查和计算结果可以看出，在沙丘不同位置植被覆盖度也不相同。迎风坡与背风坡覆盖度大致相同。从三个样地的盖度来看，147 团样地的盖度最高，两坡差异较小，坡顶存在流动带，坡中下部分基质比较稳定，盖度比较均匀。150 团样地迎风坡植被盖度存在两坡差异，背风坡盖度略高于迎风坡，从物种分布的情况来看，150 团样地迎风坡受风沙扰动比较强烈，物种分布密度很低，主要为白梭梭—白皮沙拐枣群丛，零星分布一些猪毛菜，沙蓬、角果藜等。背风坡除了白梭梭、白皮沙拐枣外，还分布有沙漠绢蒿、新疆紫罗兰、沙漠绢蒿、东方旱麦草、沙生千里光以及一些短命植物。但由于土壤水分含量低，虽然物种有很高的丰富度和多样性，但除了背风坡底部外，物种密度很低，并不能为盖度做出有效的贡献。 149 团样地盖度略高于 150 团，梭梭和白皮沙拐枣的密度较高，为其盖度做出很大贡献。而 147 团样地较高盖度来自于沙漠绢蒿—心叶驼绒藜 —补血草群丛和虫实—异翅独尾草群丛的群落组合，物种在样方内密度较高，单个物种生物量较大，虽然 147 团样地物种丰富度和多样性的不是很高，但是这样组合却给盖度做出了重要贡献。149 团样地物种相较而言，更显得单一，但是白梭梭、白皮沙拐枣的密度却相对较高，这是其盖度高于 150 团的主要原因。盖度是植被影响沙面稳定的最重要因素，能直接降低风蚀的强度以及风蚀对沙面的剥蚀作用。虽然均匀度也是沙面稳定的重要因素，但必须在一定盖度的前提下才有作用。147 团样地在覆盖度和均匀度方面都优于其他两个样地，这对于其沙面的稳定具有重要意义。149 团样地的盖度来自梭梭的贡献，但由于其物种比较单一，下垫面缺少比较矮小的物种的保护，虽然盖度大于 150 团样地，但对沙面稳定的意义不大。150 团样地较高的物种丰富度并不能为其盖度做出贡献，由于受到风蚀干扰，沙丘除了背风坡底部以外。基质长期处于不稳定状态。这对于沙面稳定是不利的。

4.3.3 沙粒径与沙面稳定的关系

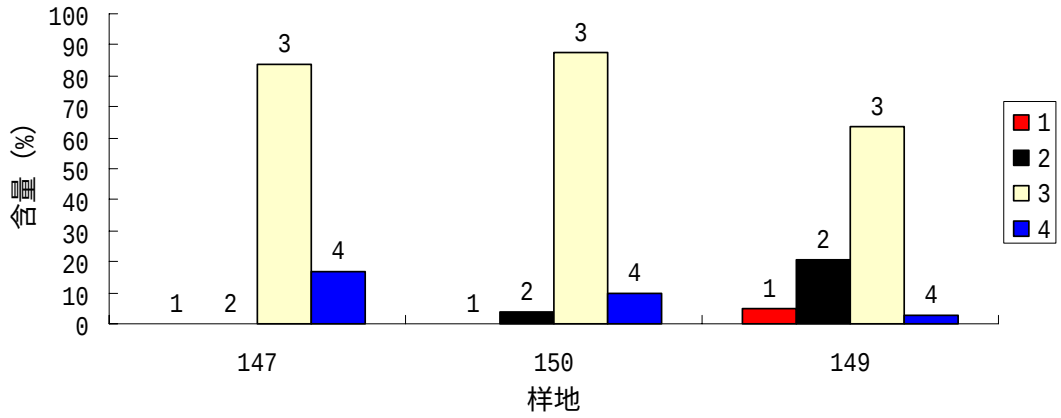

图 4-3 不同粒径的沙在三个样地的含量

Fig.4-3 content of sand in different diameter of study sites

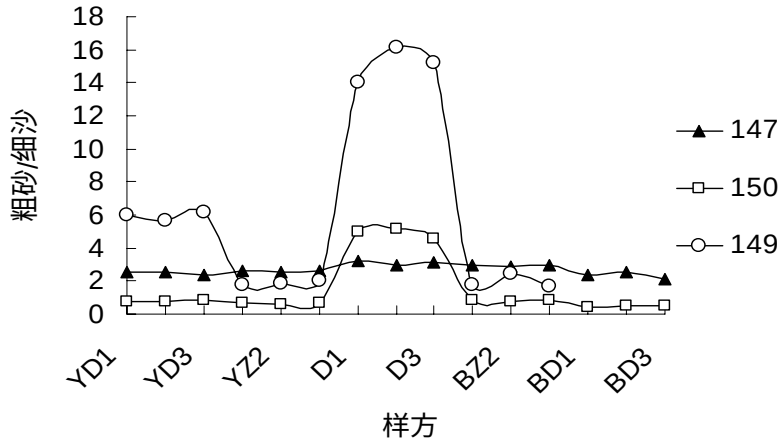

图 4-4 沙粒径在三个样地不同坡位的走势图

Fig.4-4 The line of change of sand in diameter on different slop positions of different study sites

高粒径对风沙活动有抑制作用，粒径主要影响起动风速，沙粒的机械组成的垂直分异的重要意义还在于它和孔隙率、容重、含水率、渗透率、粘结性等密切相关[109]因此，沙粒径在沙丘上的分异也在一定影响水分的垂直分布。而植被的分布又与水分差异相关。从图可知，147团样地沙丘土主要有细沙和粉砂组成，且分选性差，沙粒在不同坡位变化基本不变。150团样地以细沙为主，中沙和粉砂占少量。因此，土壤含水率、渗透率、粘结性方面都优于150团和147团样地。而这些因素都是沙面稳定的积极因素。149团样地以细沙和中沙为主，粗砂和粉砂占一定比列。而从图进一步发现不同粒径沙在不同坡位的变化，而149团和150团样地沙粒的分化主要出现的顶部两坡的差异不明显。引起这种差异的原因可能是风沙活动的强度在沙垄不同部位存在差异，风速由迎风坡脚至丘顶逐渐加速,在垄顶达到最大,至背风坡的中上部剧烈降低,此后又逐渐恢复。在风力的筛选作用是造成沙面粒径分异的直接动力，迎风坡的沙粒被扬起并在背风坡沉积下来，长期便形成沙垄迎风坡陡而短，背风坡缓而长的现状[111]。150团样地沙丘高度

较高，风蚀较大，风力对沙粒的筛选作用明显，所以形成了上述这种情况。而且沙垄上部和顶部的机械组成较垄间低地更有利于风力的搬运。土壤基质极不稳定，不利于种子着床，所以只有少数物种如羽毛三芒草、梭梭、沙蓬等对风蚀忍耐高的物种能成功侵入。

4.3.4 土壤含水量与沙面稳定的关系

图 4-5 是三个样地土壤含水量在不同坡位的变化。总的来看，150 团样地迎风坡土壤含水量明显低于背风，顶部最少，样方间存在一定差异。含水量变化约在 0.4～1.7%之间。147 团样地的平均含水量高于其他两地，背风坡略明显高于迎风坡，坡底含水量最高，坡顶最小，样方间差距很大。含水量变化约在 0.3～2.2%之间。从相关性分析看，水分分布与坡位、坡度具有显著的相关性。149 团样地土壤含水量很低，且样方间差异很小。含水量低于 0.6%。

水分是影响干旱区植物分布最重要的原因，在古尔班通古特沙漠，水分在沙丘的垂直分异，与植被在沙丘不同坡位规律分布格局相关。而植被的分布又是影响沙面稳定的程度中原原因之一。水分对沙面稳定的意义还在于提高沙物质之间的粘连性，直接抑制风力对沙面的侵蚀。147 团样地虽然没有大量的短命植物存在，但是其较为稳定的分水加上较为稳定的土壤基质，为一年生和多年生长营养期植物的发生提供了条件。

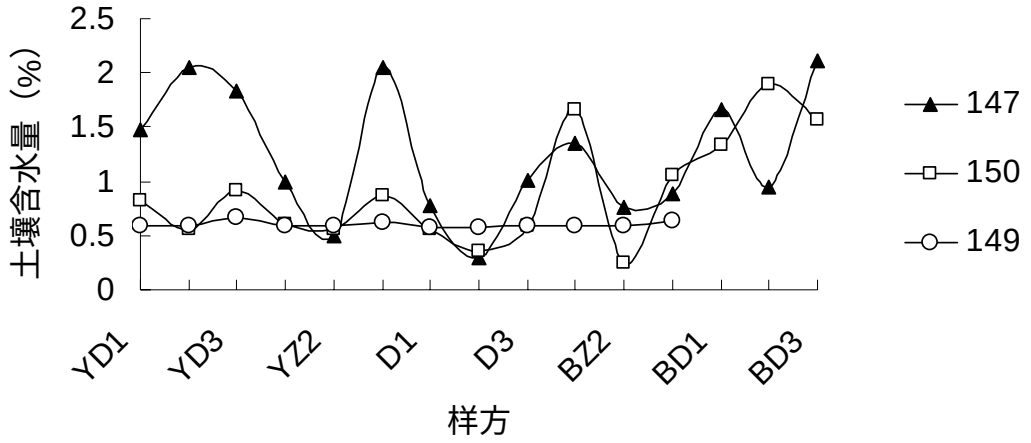

图 4-5 含水量在三个样地不同坡位的走势图

Fig.4-5 The line of change of soil moisture on different slop positions of study sites

沙面的稳定关键在于土壤植被因子对风蚀的抑制作用。对于土壤风蚀的影响因子及机理的研究，不同学者在不同的环境和研究方向上有不同的见解，提出众多关于启动风速、风蚀范围、风蚀量的表达式[112~119]。总的来说，在这些表达式中，都涉及植被覆盖，土壤颗粒直径、以及土壤含水量。并且表现出极为复杂的关系。单个因子的影响往往与另一个因子相关。各表达式都表明：启动风速随植被覆盖和土壤含水量、土壤颗粒直径增加而增加。只是由于研究对象和研究方式的差异，导致其内关系呈现出复杂化和不确定性。

4.3.5 地形对沙面稳定的影响

三个样地在坡位和坡度之间存在差异。147 团沙丘高度为 13m，两坡坡度为约为 45 度。两坡坡度差异不大。149 团样地沙丘高度为 6m，迎风坡坡度为 30 度，背风坡坡度约为 13 度。150 团样地沙丘高度为 18m，迎风坡坡度约为 65 度，背风坡中上部坡度约为 45 度，中下部坡度约为 30 度。

从本研究的数据来看，147 团和 150 团样地在水分分布、植物分布、粒径组成等在不同的坡位和坡度之间存在差异。而 149 团样地由于坡度和坡位特征不明显。各项环境因子之间差异较小。可见坡度和坡位对环境因子的影响。坡位和坡度首先影响水分在沙面的垂直分布，在每次有效降水后，沙丘中山部分水分沿坡面下渗，导致沙丘中上部分水分含量减少，沙丘不同部位受风蚀的程度也不同，一般为迎风面大于背风面，坡中上部大于中下部。而风蚀一方面影响了水分蒸发速率，另一方面，风蚀还造成种子着床困难，影响植物侵入，直接影响植物分布。除此以为，风蚀造成的沙蚀和沙埋通过影响植物种子萌发、幼苗的存活率对植物分布形成环境压力。沙粒的机械组成在坡位之间的差异也是由于不同风力在不同坡位间的筛选作用造成的。而且坡位和坡度的差异加上风力和植被的作用，更容易造成小范围的环境差异而增加物种的多样性。以上事实说明，坡度在风力的作用下受限于沙丘的高度，高度越高，两坡坡度差异越大，沙面受风蚀的影响越严重，尤其在迎风面。沙丘高度太低，又不足以降低风速。因此，沙丘高于沙面风蚀存在一定的临界值，风速与沙丘高度及植被盖度之间的关系还有待于进一步研究。除此之外，其他研究还表明：沙丘不同坡度和坡位之间在土壤含水量、地温、空气湿度、植物分布等都存在明显差异[120]。

综上所述，我们根据影响沙面稳定的因素的高低在各样地间进行三级评价，如下表

表 4-2 三个样地间沙面稳定的因素的三级评价

Tab4-2 evaluation in three classes of factor about steady of sand surface in different study sites

	物种丰富度	物种多样性	均匀度	盖度	粒径组成	土壤含水量
147 团	**	**	***	***	**	***
150 团	***	***	**	*	*	**
149 团	*	**	*	**	***	*

注：***表示最好 **表示次好 *表示最差

若按每个样地所得的*给每个样地稳定性进行对比。147 团样地为 16 个*。150 团为 12 个*。149 团为 10 个*。147 团样在盖度、均匀度、土壤含水量上都优于其他两地，而物种多样性和丰富度处于平均水平。总的来看，147 团样地的沙面稳定性最高。，150 团样地虽然物种丰富度和多样性较高，但由于生物量过小，并不能形成有效的盖度。粒径组成也不利于沙面的稳定，土壤含水量处于中等水平。因此 150 团样地的沙面稳定性次于 147 样地。，149 团样地物种多样性和丰富度都处于较低水平，存在一定的植被盖度，粒径组成有利于沙面的稳定，土壤含水量较低，但由于没有合理的物种组合和均匀度，盖度沙面的稳定贡献被削弱。沙丘高度也不利于阻挡风蚀。因此三个样地中 150 团样地沙面稳定性最差。

4.4 沙面稳定性评价

沙丘的形态、沙粒度、沙面含水量、植被分布等是影响沙面活动过程的下垫面因素。

蚀积量是反映沙面活动的指标，同时也是评价沙面稳定重要指标[121~122]。蚀积量反映了一定时间内某个点沙物质的盈亏，比较注重沙面活动后的结果，但我们发现，某点蚀积量如果没有变化或变化很小，并不能说明该点没有或风沙活动很小。而输沙量直接反映了一定时间内某点沙物质活动的量，缺点是不能反映沙物质的亏损。因此本研究采用蚀积量和输沙量一起共同评价沙面的活动情况。如图，我们可以发现相同位点的蚀积量和输沙量的变化并不是都程线性关系，说明采用蚀积量和输沙量共同评价沙面活动比只用蚀积量更为科学。

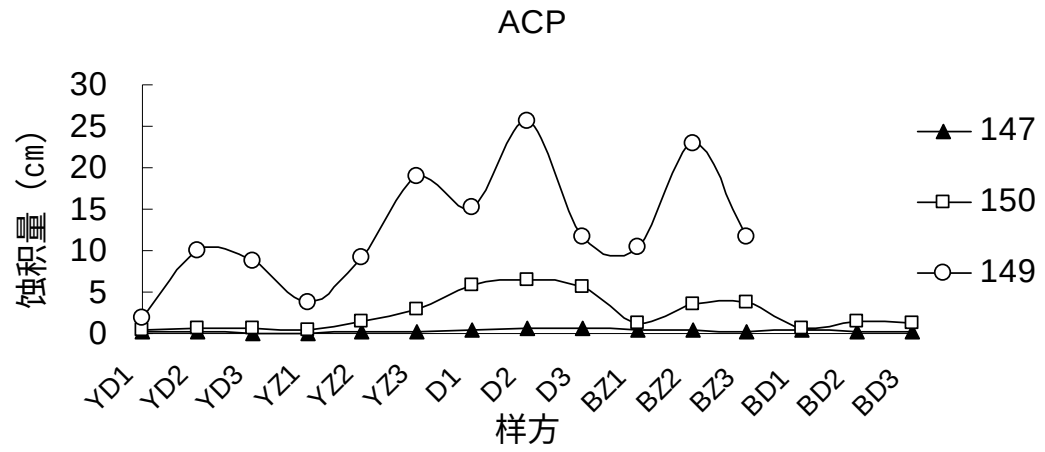

图 4-6 三个样地不同坡位蚀积量的走势图

Fig.4-6 The change of sand erosion of different slop positions in different study sites

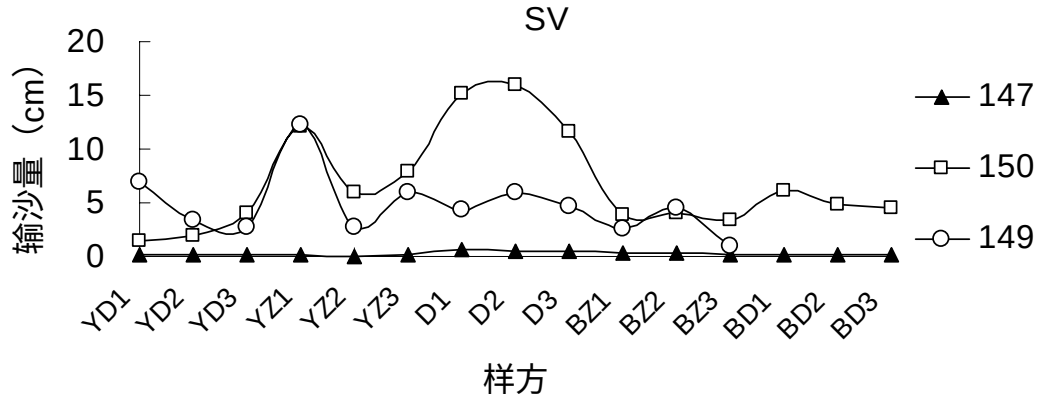

图 4-7 三个样地不同坡位输沙量的走势图

Fig.4-7 The change of sand importation of different slop positions in different study sites

总的来看，147 团样地的蚀积量和输沙量都处于很低的水平，说明沙面基质较为稳定。150 团样地的蚀积量明显低于输沙量，说明蚀积量低估了沙面活动的强度，应该参考输沙量来考量。而 149 团样地的蚀积量和输沙量都处于较高的水平。说明风沙活动比较强烈。所以我们认为 147 团样地沙面稳定性最高，150 团次之，149 团沙面稳定性最低。

小结：综上所述，影响沙面稳定因素很多，影响的方式也各不相同，彼此之间又相互联系、相互影响，因子的单方面作用将被削弱。高的物种丰富度如果没有较大的生物量作为基础，就不能形成有效的盖度，如 150 团样地。如果没有比较合理的物种组合和均匀度，高盖度也不能为沙面的稳定做出贡献。149 团样地属于这种情况。土壤湿度、粒径组成、一方面能直接影响沙面的稳定，另一方面又能影响植物的分布。而土壤有机质，土壤无机矿物质对沙面的稳定没有直接意义，但却能影响植物的分布。地形因素能影响风力对沙丘作用，导致物质和能量在沙丘各部位的分布的差异。高的沙丘能在正面阻挡风力的作用，但其迎风面受到风力的侵蚀比较严重，沙粒也不断被从迎风面搬运至背风面，导致背风面基质也不稳定，形成明显的两坡差异。但是在沙丘的背风面的中下部是整个沙丘最为稳定，环境条件最好的部位，常常发生大量植物。而在较低沙丘高度下，不能形成两坡差异，风蚀对整个沙丘持续作用，整个沙面基质均不能稳定，影响了植物的发生和存活。对沙面的稳定不利。因此，在古尔班通古特沙漠，没有两坡的差异和两坡差异过大，对于沙面的稳定都是不利的。因此，固定半固定沙丘存在一个合理的沙丘高度。

第五章 结论与建议

5.1 结论

本研究位于古尔班通古特沙漠南缘莫索湾地区，在 40km 的跨度上选取三个具有不同植被状况和环境差异的样地，对 3 个样地 42 个样方内的物种多度、盖度、株高进行测定,计算每个样方内物种的重要值。运用 TWINSPAN 和 DCA 排序结合的方法，对各样地的植物群落进行了分类。并运用 CCA 排序方法分析了物种分布与环境的关系。在各样地之间对植物丰富度、植物多样性，植物均匀度、植被盖度、土壤含水率、沙粒径、及地形因子等影响沙面稳定的各项相关因子进行分析对比，并运用蚀积量和输沙量两项指标对个样地沙面稳定性进行了评价。从多个方面进一步探讨植被类型与沙面稳定性的关系。研究得到以下结论：

一、三个样地的群落主要分为五种类型：

角果藜—异翅独草群丛 、长翅猪毛菜群丛、白梭梭—白皮沙拐枣群丛、沙蓬—角果藜群丛和沙漠绢蒿—心叶驼绒藜 —补血草群丛。

DCA 分析表明：样地样方存在不同程度的聚集，说明样方之间存在明显的环境差异，由于物种对环境适应能力不同，各群丛在三个样地存在明显的分布差异，虫实—异翅独尾草群丛主要分布于 150 团和 147 团样地。长翅猪毛菜群丛主要分布于 149 团样地。白梭梭—白皮沙拐枣群分布于 150 团和 149 团样地。沙蓬—角果藜群丛和沙漠绢蒿—心叶驼绒藜 —补血草群丛主要分布于 147 团样地。

二、CCA 分析结果表明，可溶性盐含量对植被分布影响不显著。白梭梭—白皮沙拐枣群丛分布与输沙量、蚀积量相关，表明该群丛对极端环境适应能力较强，是植被演替的先锋物种。角果藜—异翅独草群丛的分布与有机质和土壤含水量相关，该类型对环境因子的依赖较强。长翅猪毛菜群丛的分布与 Ca^{2+}离子相关，与有机质和土壤含水量呈负相关，该群丛的耐旱能力耐贫瘠能力较强，但对风蚀的忍耐能力相对较弱。沙蓬—角果藜群丛和沙漠绢蒿—心叶驼绒藜—补血草群丛的分布与坡度、坡位相关，与输沙量、

蚀积量呈负相关，说明该群丛属于环境依赖型，是演替中期的物种。总的来看，150 团和 149 团样地群落物种丰富度、多样性、均匀性均呈不同程度的下降趋势，而生态优势度呈增大趋势，群落物种数减少，优势种更加突出，说明沙地活化在加剧。

三、物种丰富度和多样性并不能直接对沙面的稳定性造成影响，必须对盖度和均匀度做出贡献才有意义。较小的粒径组成能提高土壤的持水能力，而较大的粒径组成能增加风蚀对沙面的启动风速，因此，粒径对沙面稳定是积极的还是消极的，必须与样地环境相结合。而土壤含水量一方面决定了物种的分布格局，另一方面，增加了土壤的粘连性，减小风蚀对沙面的影响。坡度受限于沙丘高度，坡度和高度一方面通过影响水分分布，从而影响沙面植被的分布格局。另一方面，坡度和高度决定不同坡位风沙活动差异，影响粒径的垂直分异。沙丘高度还与风蚀强度密切相关。

四、通过对各样地及影响沙面稳定的各因子的综合分析，147 团样地的沙面最稳定，150 团次之，149 团最差。通过沙面的输沙量和蚀积量的标准来看，也得到了相同的结论。

5.2 建议

本文通过对不同生境下沙面稳定性研究，对沙面保护和防止流沙化提出以下建议：通过发展植被保护沙面应根据实际情况而定，利用固定沙丘的生境差异，在沙丘不同部发展不同的植物群落。应主要加强对迎风坡的保护，沙丘中、底部发展、虫实—异翅独尾草群丛（Ass. *Corispermum lehmannianum—Ceratocarpus arenarius*）、生物结皮等为主的群丛。沙丘顶部发展白梭梭—白皮沙拐枣群丛(*Ass.Calligonum leucocladum—Haloxylon persicum*）、羽毛三芒草（*Aristida pennatatrin*）等为主的群丛。沙丘中部和底部注重生物结皮的保护。春季土壤含水量、空气湿度、空气温度适合短命植物的生长发育。秋季的土壤含水量、空气湿度、空气温度适合白梭梭等的生长发育。在不同季节培育不同植被。

对于环境差异不大的沙丘应进行全面保护，开始应大量发展白梭梭—白皮沙拐枣群丛(*Ass.Calligonum leucocladum—Haloxylon persicum*)，待沙面风蚀减小后，可适当种植一些草本植物。对于沙粒径较大的沙丘，如果有条件，可适当进行滴灌。对于沙粒径小的沙丘则注重对下垫面的保护，防止牲畜践踏，可设置围栏。

坚持使用本地物种保护，可在当地植物种子散播时进行种子的人工收集。可对种子进行相应处理，以提高发芽率，待来年冬雪融化之际，适时播撒，以提高成活率。

若有重大施工项目时，应加强对植被保护的管理，可在施工区内设置限制活动区。

参考文献

[1] 孙红雨，王长耀，牛铮，等．中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系-基于 NOAA 时间序列数据分析[J]．遥感学报，1998,2,(3):204-210.

[2] 潘晓玲．干早区绿洲生态系统动态稳定性的初步研究[J]．第四纪研究，2001,21,(4)：345-351.

[3] 张立运，刘速，周兴佳，等．古尔班通古特沙漠植被及工程行为影响[J]．干旱区研究，1998,15(4):16-21.

[4] 钱亦兵．古尔班通古特沙漠生境对植物群落格局的影响．地理学报, 2003, 33, (4):1355-1361.

[5] 朱震达.中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理对策[M].北京:中国环境出版社, 1999 32(7):113-115.

[6] 刘贤万．实验风沙物理与风沙工程学[M]．北京：科学出版社,1995:122-132.
[7] 张立运,陈昌笃．论古尔班通古特沙面植物多样性的一般特点[J]．生态学报,2002,22,(11):1923-1933.
[8] 王雪芹,张元明,蒋进等．古尔班通古特沙面南部沙垄水分动态—兼论积雪融化和冻土变化对沙丘水___分分异作用[J]．冰川冻土,2006,28,(2):262-268.
[9] 初雨，陈鹏．古尔班通古特沙漠边缘生态环境建设策略[J]．新疆环境保护，1999,21(3):44-47.
[10] 李江风．新疆气候[M]．北京：气象出版社,1991:97-107.
[11] 王雪芹，蒋进，雷加强，等．古尔班通古特沙漠重大工程扰动地表稳定性与恢复研究[J]．资源科学，2006,28(5):190-195.
[12] 王雪芹,蒋进.短命植物分布与沙垄表层土壤水分的关系[J].应用生态学报,2004,4:(15):556-560.
[13] 李银芳，杨戈．不同水分生境对梭梭耗水量的影响[J]．干旱区研究,1992, 9,(4):45-50
[14] 黄培祐．准葛尔盆地荒漠生物群落与环境关系[J]．生态学杂志,1991,10,(1):6-10.
[15] 吴正,气流与自然地理环境综合影响下准噶尔盆地沙地地貌发育的基本特征[c]．全国地理学会论文选集,地貌．北京:科学出版杜．1962:1-17.
[16] 季方,樊自立,赵贵海．新疆两大沙漠风沙土土壤理化特性对比分析[J]．干早区研究,1995,12(6):19-25.
[17] 杨小荟,王玉宝,崔东等．古尔班通古特沙漠砂的物理力学性质[J]．中国沙漠,2005,25(4):563-569.
[18] 钱亦兵,周兴佳,吴兆宁．准噶尔盆地沙物质粒度特征研究[J]．干旱区研究，2000,17(2):34-41.
[19] 王春玲,郭泉水,谭德远,等． 准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究[J].应用生态学报,2005,16(7):1224-1229.
[20] 赵哈林,苏永中,周瑞莲．我国北方沙区退化植被的恢复机理[J] ．中国沙漠,2006,26,(3):323-328.
[21] 钱亦兵,张立运,吴兆宁,等． 新疆准噶尔盆地边缘部分地段生态环境特征[J]．干旱区地理，2003,26[1]:30-36.
[22] 王雪芹,雷加强．古尔班通古特沙漠半固定沙垄沙面的蚀积特征．干旱区研究,1998,15(1):35-39.
[23] 钱亦兵，李银芳．莫索湾垦区荒漠化土地物理特性研究． 干旱区研究,1999, 16(2):41-46.
[24] 赵雪辉．昌吉州环境可持续发展对策研究[R]．新疆环境状况公报，2005.
[25] E．Warming.植物生态学植物群落研究引论．陈庆诚译)[M]．北京:科学出版社,1965:4-7.
[26] B．B．阿略兴．植物地理学,傅子祯等译)[M]．北京:高等教育出版社,1957:15-27.
[27] 孙儒泳,李博,诸葛阳,等．普通生态学[M]．北京：高等教育出版社，1993:147.
[28] 奥德姆著，孙儒泳等译．生态学基础[M]．北京:人民教育出版社，1981:606.
[29] 李博．生态学[M]．北京：高等教育出版社，2000:339-365.
[30] 孙儒泳,李庆芬,牛翠娟,等．基础生态学[M]．北京:高等教育出版社,2002:192-193.
[31] 刘映良,薛建辉．贵州茂兰退化喀斯特森林数量分类[J]．贵州师范大学学报,自然科学版)．2005,23(2): 1-5.
[32] 胡理乐，毛志宏，朱教君，等． 辽东山区天然次生林的数量分类[J]．生态学报．2005, 25(11): 2848-2854.
[33] 张金屯，邱扬，柴宝峰，等． 吕梁山严村低中山区植物群落演替分析[J]．植物资源与环境学报．2000,9(2): 34-39.
[34] 张金屯,杨洪晓． 自组织特征人工神经网络在庞泉沟自然保护区植物群落分类中的应用[J].生态学报．2007,27(3):1005-1010
[35] 张金屯．数量生态学[M]． 北京:科学出版社，2004:45-48.

[36] 牛健明，呼和．我国植被与环境关系研究进展[J]．内蒙古大学学报，2000,30(1):76-80.
[37] 阳含熙，卢泽愚．植物生态学的数量分类方法[M]．北京:科学出版社，1981.
[38] 张峰．张金屯．我国植被数量分类和排序研究进展[J]．山西大学学报,自然科学版)，2000, 23 (3):278-282.
[39] 张金屯．植被数量分析方法的发展．当代生态学博论[M]．北京，中国科学技术出版社，1992: 249 -265.
[40] 阳含熙，卢泽愚，杨周南．植物群落数量分类的研究一关联分析和主分量分析[J]． 林业科学，1979,12(4):244-255.
[41] 艾训儒．狮子关库区植物群落的数量分类[J]．福建林学院学报．2002,22(4):356-360．
[42] 曹霞，周广柱，武春成．大凌河朝阳段滨河植物群落数量分类与地理位置的关系[J]．科技情报开发与经济, 2006, 16(3): 159-160.
[43] 戚继忠，丁梦娟，王宝良．数量分类的加权聚类法[J]．吉林林学院学报,1995, 11:(2):91-95.
[44] 毕润成，阎桂琴，黄文选．霍山森林群落的数量分类[J]．山西师大学报,自然科学版），1992,8,(1):50-54.
[45] 张金屯．模糊聚类在荆条灌丛分类中的应用[J]．植物生态学与地植物学丛刊,1985, (4): 141-149团.
[46] 余小平，李新．重庆南山马尾松群落的数量分类研究[J]．重庆师范学院学报,自然科学版），1992,9(1):55-60.
[47] 高琼，郑慧莹．模糊 ISODATA 在草地植物群落分类上的应用[J]．植物生态学与地植物学学报,1991,15(4):142-148.
[48] 阳含熙，卢泽愚，杨周南．植物群落数量分类的研究一信息分析和主坐标分析[J]．自然资源．1979,6(1):14-20.
[49] 郝占庆，郭水良． 长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]．生态学报，2003, 23(10):2000-2008.
[50] 张金屯．典范指示种分析—一个新的外在分类方法[J]．植物生态学报，1994,18(4):379-384.
[51] 王健,张韬.TWINSPAN 算法的实现和应用[J].内蒙古大学学报,自然科学版).2007,38(1):79-83.
[52] 郭东罡,上官铁梁.中条山中段植物群落数量分类与排序研究[J].武汉植物学研究,2005, 23(5): 444-448.
[53] 张金屯．群落排表分类的两种数学方法 [J]．植物研究,1994,14(2):179-185.
[54] 兰国玉，雷瑞德，安锋，等.秦岭华山松群落数量分类研究[J].生态学杂志,2006,25(2):119-124.
[55] 张金屯．排序轴分类法及其应用[J]．生态学杂志,1994,13(3):73-75.
[56] 庾晓红，李贤伟，白降丽．我国植被数量分析方法的研究概况和发展趋势[J]．生态学杂志,2005,24(4):448-451.
[57] 茹文明，张峰．中条山东段植被垂直带的数量分类研究[J]．应用与环境生物学报,2000,6(3):201-205.
[58] 张金屯.植物与环境关系的分析II:CCA 和 DCCA 限定排序[J].山西大学学报,自然科学版),1942, 15 (3):292-298.
[59] 张金屯．模糊数学排序及其应用[J]．生态学报，1992, 12 (4): 325-331.
[60] 张峰，景周管．模糊数学在我国生态学中的应用[J]．山西大学报，1991,14 (3): 321-326.
[61] 张峰,张金屯．我国植被数量分类和排序研究进展[J]．山西大学学报，2000,23(3):278-282.
[62] 魏文寿,刘明哲.古尔班通古特沙漠现代沙漠环境与气候变化[J].中国沙漠,2000,20(2):179-184.
[63] 李新荣，贾玉奎，龙利群 等．干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]．中国沙漠，2001,21(1):4-11.
[64] 顾峰雪，张远东，潘晓玲 等．阜康绿洲土壤盐渍化与植物群落多样性的相关分析[J]．资源科

学，2002,24(3):42-48.
[65] 梁存柱，刘钟龄，朱宗元等．阿拉善荒漠区一年生植物层片物种多样性及其分布特征[J]．应用生态学报，2003,14(6):897-903.
[66] 陈鹏，初雨，顾峰雪 等．绿洲－荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素的空间异质性分析[J]．应用生态学报，2003,14(6):904-908.
[67] 张元明，陈亚宁,张道远．塔里木河中游植物群落与环境因子的关系[J]．地理学报，2003,58(1):109-118.
[68] 朱震达，吴正，刘恕．中国沙漠概论[M]．北京:科学出版社，1980:64-65.
[69] 杨景春．中国地貌特征与演化[M]．北京:海洋出版社，1993:151.
[70] 季方，叶玮，魏文寿.古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘成因初探[J]．干旱区地理，2000,23(1):32-36.
[71] 王雪芹，张元明.古尔班通古特沙漠生物结皮对地表风蚀作用影响的风洞实验[J]．冰川冻土，2004,26(5):632-638.
[72] 陈亚宁，李卫红．新疆古尔班通古特沙漠生物结皮在沙丘尺度的生态与环境解释[J]．科学通报，2005,15(10):1211-1216.
[73] 张立运,陈昌笃．论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点[J]．生态学报,2002,22(11):1923-1932.
[74] 钱亦兵，吴兆宁，张立运，等．古尔班通古特沙漠植被与环境的关系[J]．生态学报，2007,27(7):2802-2811.
[75] 董宝治,陈渭南．植被对风沙土风蚀作用的影响．环境科学学报，1996,16(4):37～443．
[76] 刘小平，董治宝．直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究．中国沙漠， 2002, 22(1):82-87.
[77] 董治宝，Donald W,高尚玉．直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验．中国沙漠，2000, 20(3):260-263.
[78] 王雪芹，雷加强，蒋进，等．古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定的意义．地理学报，2003,58(4):598-605．
[79] 沈泽昊，张新时． 三峡大老岭森林物种多样性的空间格局分析及其地形解释[J]． 植物学报，2000, 42 (6): 1089-1095．
[80] 茹文明，张峰．中条山东段植被垂直带的数量分类研究[J]．应用与环境生物学报，2000,6(3):201-205.
[81] 江洪．东灵山植物群落的排序,数量分类与环境解释[J]．植物学报，1994,36(7):539-551.
[82] 倪健．浙江泰顺乌岩岭常绿阔叶林的数量分类和排序[J]．华东师范大学学报．自然科学版,1995,(4):74-80.
[83] 汪建华,赵群芬,黄林．重庆四面山常绿阔叶林群落的数量分类[J]．西南农业大学学报,2001,23,3):199-201.
[84] 沈泽昊,方精云,刘增力，等． 贡嘎山东坡植被垂直带谱的物种多样性格局分析[J]． 植物生态学报，2001, 25(6):721-732.
[85] 张元明,曹同,潘伯荣,等． 新疆博格达山地面生苔藓植被的数量分类与排序研究[J]． 植物生态学报，2002, 26(1):10-16．
[86] 曹杨,上官铁梁,张金屯,等． 山西五台山蓝花棘豆群落的数量分类和排序[J]． 植物资源与环境学报，2005,14(3):1-6.
[87] 江洪,黄建辉,陈灵芝，等． 东灵山植物群落的排序、数量分类与环境解释[J]． 植物 学报，1994,36(7):539-551.
[88] 郝占庆.长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]． 植物生态学报，2003,27(6):733~741.

[89] 郭水良,陈建华,王芬,等． 金华山树种分布与环境的除趋势典范对应分析[J]． 华东师大大学学报,自然科学版) 2002,3(1):96-103.
[90] 郭水良,刘鹏,陈刚,等．浙江金华山植物区系与植被[J]．浙江师范大学学报 ,1993,16(2):59-6
[91] 郭水良,刘鹏．浙江金华山植物区系地理的研究[J]．武汉植物学研究,1995,11(4):307-314.
[92] 刘鹏,郭水良．浙江北山蕨类植物区系的研究[J]．浙江师范大学学报, 1997,20(3):85-92.
[93] 刘鹏,郭水良,蔡在龙．浙江北山植物资源及其开发利用[J]．山地研究,1992,10(2):179-185.
[94] 鲍士旦．土壤农化分析[M]．北京：中国农业出版社，2000,33-85．
[95] 中国植被编委会．中国植被[M]．北京:科学出版社,1983,143-156.
[96] 中国科学院生物多样性委员会．生物多样性研究的原理与方法[M]．北京：中国科学技术出版社,1994.
[97] 陶玲． 新疆北部短命植物的特征分析． 草业科学，2005, 22(5): 19-24．
[98] 张金屯．植物与环境关系的分析排序[J]．山西大学学报,自然科学版)，1992,15(2):182-189.
[99] 刘蕾，历山白云洞植被数量生态学研究．[D] ,太原：山西大学，2006.
[100] 高昆，历山山核桃群落数量生态研究[D] ,太原：山西大学，2008.
[101] 韩虹，连翘群落数量生态研究[D] ,太原：山西大学，2008.
[102] 邱扬,张金屯.DCCA 排序轴及其在关帝山八水沟天然植物群落生态梯度分析中的应用[J].生态学报，2000,20 (2): 199-206.
[103] 宋永昌．植被生态学[M]．上海：华东师范大学出版社， 2001:210-321.
[104] 陈荣毅,张元明，魏文寿,等.不同沙丘部位和不同结皮类型对土壤种子库的影响.干旱区研究25(1):107-113.
[105] 沈泽昊，张新时，金义兴． 三峡大老岭森林物种多样性的空间格局及地形解释[J]．植物学报，2000，42(6):620-627.
[106] 张建彪．五台山蓝花棘豆草甸α和β多样性研究[J]．山西大学学报，2005,28(4):432-435．
[107] 马克平，黄建辉，于顺利 等．北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅱ．物种丰富度、均匀度和物种多样性[J]．生态学报，1995,15(1):268-277.
[108] 姜汉侨，段昌群，杨树华．植物生态学[M]．上海：华东师范大学出版，2001.
[109] 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.
[110] 朱朝云，丁国栋，等．风沙物理学[M]．北京：中国林业出版社，1991: 44.
[111] 盖世广，王雪芹等，古尔班通古特沙漠半固定沙垄表面风速变化规律研究．水土保持学报，2008,22(4):30-34.
[111] 齐述华,牛铮,王军邦,等．1982~2001 年间中国干旱发生时空特征的遥感分析．土壤学报,2006,43(3):376-382.
[113] 姜娜,邵明安,雷廷武．水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的空间变异及其分形特征．土壤学报,2005,42(6):904-908.
[114] 杨秀春,严平,刘连友,等．农牧交错带不同农田耕作模式土壤风蚀的风洞实验研究．土壤学报,2005,42(5):737-743.
[115] 董治宝,陈渭南,李振山,等．风沙土水分抗风蚀研究．水土保持通报，1996,16(2):17-23.
[116] 胡孟春,刘玉璋,乌兰,等．科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究．中国沙漠,1991,11(1):22-29.
[117] 刘贤万．实验风蚀物理与风沙工程学[M]．北京:科学出版社,1995.
[118] 马耀明,刘东升,王介民等． 卫星遥感敦煌地区地表特征参数研究[J]高原气象,2003,22(6):531-536.
[119] 申彦波,沈志宝,杜明远,等.敦煌春季沙尘天气过程中某些参量和影响因子的变化特征[J].高原气象,2003,22(4): 378-384.

[120] 吕力春，古尔班通古特沙漠小生境差异研究． [D] 乌鲁木齐：新疆大学，2005.
[121] 李振山，张琦峰．风沙流输沙率沿程变化规律．中国沙漠，2006,26(2):189-193.
[122] 刘连友,区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究．中国沙漠，1999,1(54):59-68.
[123] Humboldt V A. Ideen Zueiner Physiognomicder Gewachse.Akad [M].Verlagsgesellschaft Leipzig, 1806.
[124] Shelfoed V E. Animal Communities in Temperate America as Illustrated in the Chicago Region. No. 5. Chicago: Bull. Of the Geographical Society of Chicago [M].Reprinted New Jork: Arno Press, 1977.
[125] Tuxen R. Entwurf einer Definitionder Pflanzengesellschaft Mitt. FLORIST. -SozioLArbeitsgem [M].Sctolzanau/Weser. 1957.
[126] Zdravko B. Vegetation environment relationships and classification of the seasonal savannas in Venezuela [J]. *Flora.* 2005, 20(0): 49-64.
[127] Sophie V, Willamd G, Frank V, etal. The influence of transformations of an ordinal scale of a floristic gradient, applied on a TWINSPAN classification [J].*Flora*. 2003, 4(198):389-403.
[128] Braak C J F. CANOCO—A FORTRAN Program for ordination by [Partial][Distended][Canonical] correspondence analysis, Principal Component Analysis and Redundancy Analysis Agricultural Mathematics Group, Box 100, 1700AC, [M]. WakeningThe Netherlands.1991.
[129] Robert D W. Ordination on the basis of fuzzy set theory. *Vegetation,*1986,66:965-981.
[130] Archer N A L, Quinton J N, Hes T M. Below-ground relationship of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in south-east Spain. *Journal of arid Environments,* 2002, 52(4):535-553.
[131] Wain Wright J, Parsons A J, Schlesinger W H,et al.Hydrology-vegetation interactions in areas of discontinuous flow on a semi-arid bajada, *southern New Mexico. Journal of Arid Enviroments,* 2002,51(3):319-338.
[132] Li X R. Study on shrub community diversity of Ordos Plateau, Inner Mongolia, northern china.*Journal of arid Environments.* 2001,47(2):271-279
[133] Dasti A. The vegetation of Cholistan and Thaldeserts, Pakistan. *Journal of arid environments,* 1994,27(2)193-208.
[134] Bolling J D, Walker L R. Plant and soil recovery along a series of abandoned desert roads. *Journal of arid enviromengts*,2000, 46(1):1-24.
[135] Bressolier C, Yves F T. Studies on wind plant interactions on French Atlantic coastal dunes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 47.
[136] Lee J A. The role of desert shrub size and spacing on wind profile parameters[J]. *Physical Geography,* 1990, 12: 72-89.
[137] Wolf S A, Nicking W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. *Progress in Physical Geography,* 1993, 17(1): 50-68.
[138] Xi J M,Deng H B, Characteristics,classification and ordination of riparian plant communities in the Three．Gorge areas[J].*Journal of Forestry Research*，2002,3,(2):111-114.
[139] Hill M O. TWINSPAN-A FORTRAN Program for Arranging Multivariate Data in an Ordered Two-way Table by classification of the Individuals and Attributes [M].Cornel University, Ithaca, N.Y,1979.
[140] Zhou Q,Robson M.Automated rangeland vegetation cover and density estimation using ground digital image sand aspectral-contextual classifier [J]. *Remote Sensing,*2001,22(17):3457-3470.
[141] Anatoly A G,Yoram J Kaufman,Robert Stark,et al. Novel algorithms for Remote estimation of vegetation fraction[J].*Remote Sensing of Environment,*2002,80(1):76-87.
[142] White Michael A,Asner Gregory P,Nemani Ramakrishna R,et al. Measuring fractional cover and

eaf area index in arid ecosystem:Digital camera,radiation transmittance,and laser altimetry methods[J].*Remote Sensing of Environment*,2000,74.
[143] Lander R. Statistics and portioning of species diversity, and similarity among multiple communities [J]. *Oikos*,1996,76(1):5-13.

致谢

光阴似箭，转眼间三年的硕士研究生学习阶段已接近尾声，抚今追昔，感慨良多。首先，我要衷心感谢我的恩师马淼教授，感谢他三年来对我所作的精心指导和倾注的大量心血及宝贵时间。从论文选题、方法设计、野外工作、数据分析到最终论文的定稿，无不倾注了导师大量的心血。导师活跃的学术思想，严谨求学的治学态度，忘我的工作精神，博大的胸怀和正直的为人，深深地启迪着我，鼓舞着我，是我在今后的发展道路上不断迎接挑战，克服困难，积极进取的榜样。在此谨向导师表示我我深深的敬意和最诚挚的谢意。

三年的研究生生活，我无时无刻不感觉到来自我周围的关心、鼓励和支持。衷心感谢感谢石河子大学生命科学学院阎平老师、刘彤老师、王绍明老师、张霞老师、以及所有老师在学习以及生活中给予我的关怀和帮助。

感谢我的师兄范俊峰、蔡超、骆世洪、翟伟、徐文宾、杨坤、刘海涛、彭松、孙勤河同学黄帅、孙兴光、郭一敏、吕新建、原贾、孙红燕、师弟黄刚、杨清理、田中平、在实验上的指导和和生活上的帮助。特别感谢翟伟、徐文宾、郭一敏在植物分类上的帮助以及生地所陶冶同学在数据分析上的指导和帮助。

感谢我的家人、学友和朋友对我的支持和帮助，是他们为我排忧解难，使我的毕业论文得以如期完成，在此，一并表示深深的谢意。

感谢我的父母，感谢父母在 20 多年的求学生活中一直鼓励我，教育我，让我完成了我的求学生活，没有父母就没有我的今天，没有他们的不断引导我，我也不会有今天的收获。

在这篇论文写作中，参考了许多学者、专家的有关著作、论文，汲取了许多研究成果，汇集了众家思想，值此表示真诚的感谢。限于学子的水平，论文中有不少不足之处，值得商榷和继续探讨，敬请各位专家教授批评斧正。

最后感谢所有给予过热情帮助的人们，他们的无私帮助是本文顺利完成的保证，我会永远记住你们。

作者简介

王光富，男，生于 1983 年 7 月，籍贯贵州。2007 年毕业于石河子大学生命科学学院生物科学专业，获理学学士学位。同年考入石河子大学生命科学学院植物学专业攻读硕士学位，主要从事植物生态学方面的工作。

在学期间主要参与的研究项目

参加了石河子大学基金项目《新疆极端环境中短命植物种质资源的保存与独尾草的利用》的部分工作。

在学期间发表的文章

1.王光富，马淼，马双龙，孙欣光，黄帅． 沙生类短命植物异翅独尾草种子扩散及种子库分布格局 [J]. 石河子大学学报. 2010.6