

解婷婷,苏培玺,周紫鹃,等.荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性及其与土壤理化因子的关系[J].中国沙漠,2013,33(2):508—514,doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00069.

荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性 及其与土壤理化因子的关系

解婷婷^{1,2}, 苏培玺^{1,3}, 周紫鹃^{1,3}, 李善家^{1,3}, 张海娜^{1,3}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过于2007—2011年对甘肃河西走廊中部荒漠绿洲过渡带不同立地条件下植被样方的调查,应用Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数、Shannon-Weiner指数和Simpson指数研究了不同立地条件下物种多样性的变化,并采用典范对应分析方法(CCA)研究植物物种分布与土壤环境因子的关系。结果表明:荒漠绿洲过渡带丘间低地的植被盖度和Margalef、Simpson、Shannon-Wiener、Pielou指数值均最大,流动沙丘条件下最小;Hill多样性指数排序结果显示,随着土壤水分条件的变差,物种多样性同样表现出降低的趋势。按多样性从高到低的顺序,其相应的立地条件分别为丘间低地、缓平沙坡、固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘。选取的土壤因子对过渡带植被分布的影响程度大小为土壤含水量>pH值>全钾>有机质>速效氮>全氮>速效钾>全磷>土壤盐分>速效磷。土壤含水量和pH是荒漠绿洲过渡带植被分布空间差异的最主要影响因子,前3个轴的环境解释率为98%,证明排序可信。

关键词: 荒漠绿洲过渡带; 物种多样性; 土壤因子; 典范对应分析

文章编号: 1000-694X(2013)02-0508-07

doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00069

中图分类号: Q948.113

文献标志码: A

1 引言

荒漠绿洲过渡带指荒漠生态系统和绿洲生态系统之间的接触带,属于典型的生态交错带,它是绿洲生态系统的重要组成部分,可表征绿洲生态系统的稳定性^[1]。干旱区荒漠绿洲过渡带在保持生物多样性、抑制荒漠化和维护绿洲生态安全方面起着极其重要的作用^[2]。经过绿洲化和沙漠化两种地理过程的作用^[3],在荒漠绿洲过渡带形成了多种立地类型的景观特色,由于不同立地条件下的微环境变化较大,从而影响植物的生存与生长^[4],同时由于地形控制了太阳辐射和降水的空间再分配,因而往往能较好地指示局部生境的小气候条件,反映土壤厚度和养分的空间差异,进而影响群落的物种构成、结构和动态变化,从而具有明显的生态指示意义^[5-7]。

近年来关于荒漠绿洲过渡带已开展了较多的研究。在植物种群空间格局特征方面,何志斌等^[8-9]研究表明黑河流域荒漠绿洲过渡带泡泡刺(*Nitraria*

sphaerocarpa)种群在样地内靠近绿洲和浅山区有几条明显的分布带,而红砂(*Reaumuria soongorica*)分布相对均匀,同时得出植被空间异质性受采样尺度和划区方式影响显著,植被空间异质性参数对划区方式的敏感性较强;彭飞等^[10]研究了民勤荒漠绿洲过渡带白刺(*Nitraria nebkhas*)灌丛的空间格局,发现不同演化阶段白刺灌丛沙堆的空间自相关尺度为5 m,且样方之间自相关尺度无显著差异;乌云娜等^[11]指出,在呼伦贝尔草原的克氏针茅(*Stipa krylovii*)群落的空间异质性随着放牧强度的增加呈现降低趋势,种群个体分布呈现片断化特征,且各个种群具有不同的异质化分布特点。在土壤水分方面,李禄军等^[12]研究指出黑河中游绿洲荒漠过渡带土壤水分剖面分别为速变层、活跃层和次活跃层,并认为生态垫能有效地保持沙丘土壤水分;张凯等^[13]通过对民勤绿洲荒漠带土壤水分的空间分析研究得出,过渡带土壤含水量呈现出表层及底层低、中间层高的特点,且过渡带土壤水分特性的变

收稿日期:2012-05-29; 改回日期:2012-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(91025026和31070359)资助

作者简介:解婷婷(1982—),女,陕西咸阳市人,博士,助理研究员,主要从事植物生理生态学研究。Email: xieting1026@126.com

异系数最大。在种群消长方面,杨自辉等^[14]对甘肃民勤荒漠绿洲外围降水和地下水对白刺群落进行了研究。但对荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性的研究缺乏,对其与土壤物理化学因子的关系有待探讨。为此,本文在对甘肃河西走廊中部黑河中游荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性指数分析的基础上,讨论了过渡带不同立地条件下物种多样性的变化,揭示了不同立地条件下物种多样性的排序及其与土壤物理化学因子的关系,旨在为荒漠绿洲过渡带的生态恢复和重建提供理论依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于甘肃省河西走廊中部临泽县北部(39°19′—39°21′N, 100°02′—100°21′E),属于早荒漠气候类型,海拔1 370 m,多年平均降水量 117 mm,70%的降水发生在 6—9 月间,年潜在蒸发量 2 390 mm,为降水量的 20 多倍;年均气温 7.6 ℃,最高气温 39.1 ℃,最低-27 ℃,≥10 ℃的年积温为3 088 ℃,无霜期 165 d。年日照时数为3 045 h。盛行西北风,风沙活动多集中于 3—5 月,干旱、高温和多风是其主要气候特点^[15]。

2.2 研究方法

2.2.1 样地设置与调查方法

在黑河中游临泽县北部沙质荒漠绿洲过渡带,距绿洲边缘水平距离相近的范围内,自东南到西北分别设置 5 个不同立地类型的样地,分别为丘间低地(39°21′55″ N,100°08′53.8″ E,海拔1 380 m)、缓平沙坡(39°22′0.5″ N,100°08′57.9″ E,海拔1 380 m)、固定沙丘(39°21′58.6″N,100°09′4.6″E,海拔1 380 m)、半固定沙丘(39°22′9.1″N,100°09′5.2″E,海拔1 390 m)和流动沙丘(39°22′4.0″N,100°09′4.1″E,海拔1 390 m),样地大小为 20 m×60 m,在每个样地中,再以 20 m 为间隔设置成 3 个 20 m×20 m 的灌木样方,记录每种灌木的个体数、盖度、基径、高度、冠幅等指标;同时,样方内设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,分别记录每种草本的个体数、盖度、高度、频度等指标。分析不同立地条件下植被盖度、多样性等数量指标的变化趋势,植被样地调查时间为 2007—2011 年的 9 月底到 10 月初霜降植物停止生长后,同时用土钻采集样方内 0~80 cm 深度土样,采用烘干法测定土壤含水量。

在每个样地的对应小样方内随机取土样 3 个,分 3 个层次进行,即 0~20、20~40、40~60 cm,混合后带回室内分析。土壤理化指标包括土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾含量、pH 值和盐分含量。土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法,全氮采用开氏定氮法,全磷采用高氯酸-浓硫酸消解、钼蓝比色法测定,全钾采用火焰光度计法,速效氮采用碱解扩散法,速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用原子吸收光谱法(NH₄OAc 浸提法),pH 值用酸度计法测定,土壤全盐用重量法测定。

2.2.2 数据整理与统计分析

群落或生境内物种多样性的衡量可以利用物种丰富度和均匀度指数的测量获得。物种丰富度是指一个群落或生境中物种数目的多少,是物种多样性的测度方法;物种均匀度是指一个群落或生境中全部物种的个体数目的分配情况,它反映的是各物种个体数目分配的均匀程度;而物种多样性指数是物种丰富度和物种均匀度的综合指标^[16]。因此,本文相应选取了反应物种丰富度的 Margalef 指数^[17],反映物种均匀度的 Pielou 指数^[18],以信息公式表示多样性的 Shannon-Weiner 指数^[19],以及综合反映物种丰富度和均匀度的修正的 Simpson 指数^[20]。

以上多样性指数都是一个固定的值,在取样面积一定的情况下,每个样方可以计算出一个指数值。在自然群落中,各种生态关系比较复杂,一个固定值往往不能反映物种多样性特征,因此含有参数的多样性指数受到越来越多的重视。含参数的多样性指数是指在方程中含有一个或多个可变的参数,参数取不同的值,多样性指数就不同。这样的指数有利于揭示环境的变化或时空尺度的变化对多样性的影响,也有利于多样性大小的生态解释。鉴于此,本文引入了含参数的 Hill 多样性指数^[16]。各指数计算公式如下。

Margalef 丰富度指数(R):

$$R = (S - 1) / \ln N$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$J = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln N$$

Shannon-Weiner 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

综合反映物种丰富度和均匀度的修正的 Simpson 多样性指数(D_s):

$$D_s = 1 - \sum P_i^2$$

含参数的 Hill 多样性指数(N_α):

$$N_a = (\sum_{i=1}^s P_i^\alpha)^{1/(1-\alpha)}$$

式中: $\alpha\geq0$,规定 $\alpha=1$ 时, $N_a=e^{H'}$, H' 为 Shannon-Weiner 多样性指数; $\alpha=0$ 时, $N_a=S$, N 为观察到的个体总数; S 为群落或样方中的种数; P_i 为第 i 种的个数与该样方总个数之比(按多度计算),或为第 i 种的相对重要值(按重要值计算)。

典范对应分析方法(Canonical Correspondence Analysis, CCA)是基于种类数据和环境数据集合的非线性多元直接梯度分析方法。它把对应分析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,用于研究植被与环境的关系。本研究选取 10 个土壤物理化学因子作为研究影响样点植物物种分布的影响因子,使用国际通用软件 CANOCO 分析,并用蒙特卡罗拟合(MonteCarlo permutation test)分别检验植被和土壤因子变量之间的相关显著性。根据排序图上物种的位置关系、物种与土壤

因子间的位置关系,土壤因子与排序轴间的相关性大小,定量与定性结合分析影响过渡带植被分布的土壤理化因子。

3 结果与分析

3.1 不同立地条件下土壤含水量的变化

平均 2007—2011 年 5 年土壤含水量得出,荒漠绿洲过渡带不同立地条件下土壤含水量明显呈现出表层及低层低、中间层高的特点,且各立地条件下 20~40 cm 层土壤含水量都最高(表 1)。同时得出,丘间低地 0~80 cm 土壤水分平均值最高,为 6.13%;流动沙丘的土壤水分条件最差,其值为 2.77%。方差分析表明,丘间低地的土壤含水量显著高于固定、半固定沙丘及流动沙丘($p<0.05$);缓平沙坡土壤含水量只与流动沙丘存在显著差异($p<0.05$);固定、半固定沙丘和流动沙丘三者土壤

表 1 不同立地条件下土壤含水量的差异

Table 1 Soil water content under different site condition

立地条件	不同土层深度土壤含水量/%				平均值 /%
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	
丘间低地	5.7±2.25 ^a	8.11±2.96 ^a	6.14±0.37 ^a	4.57±0.65 ^a	6.13±0.74 ^a
缓平沙坡	5.53±0.18 ^a	5.76±0.55 ^a	5.36±1.65 ^a	3.4±0.35 ^{ab}	5.01±0.54 ^{ab}
固定沙丘	4.47±1.50 ^a	5.32±1.48 ^a	4.53±1.05 ^{ab}	3.02±0.82 ^{ab}	4.34±0.48 ^{bc}
半固定沙丘	3.41±1.46 ^a	4.27±1.60 ^a	3.49±1.10 ^{ab}	2.89±0.58 ^{ab}	3.52±0.28 ^{bc}
流动沙丘	3.36±1.07 ^a	3.96±1.22 ^a	1.61±0.60 ^b	2.16±0.87 ^b	2.77±0.54 ^c

注:表中同一列中不同的小写字母表示存在显著差异($p<0.05$)。

含水量差异不显著($p>0.05$)。

3.2 不同立地条件下植物种类组成和盖度变化

2007—2011 年调查得出的黑河中游荒漠绿洲过渡带物种组成较为简单(表 2),主要有 7 种植物,分属于 4 科 7 属,其中藜科最多,为 4 种,其他科分别为 1 种。7 种植物中,灌木 3 种,即群落建群优势种蒙古沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)及其伴生种泡泡刺,还有梭梭(*Haloxylon ammodendron*);半灌木 1 种,为籽蒿(*Artemisia sphaerocephala*),占 14.3%;一年生草本 3 种,分别是盐生草(*Halogeton glomeratus*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)和沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*),占 43.9%。在沙质荒漠绿洲过渡带样地外发现的植物种还有:戈壁沙拐枣(*Calligonum gobicum*)、甘肃沙拐枣(*Calligonum chinense*)、红砂、细叶骆驼蓬(*Peganum nigellastrum*)等,在戈壁荒漠绿洲过渡带发现的植物种还有白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、黄毛头(*Kalidium cuspidatum* var. *sinicum*)、石生霸王(*Zygophyllum rosovii*)、地肤(*Kochia scoparia*)、

表 2 黑河中游荒漠绿洲过渡带不同立地条件下的物种数组成

Table 2 Species numbers under different site condition in the desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin

立地类型	物种数量/种				
	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
丘间低地	5	5	5	5	7
缓平沙坡	5	5	5	5	5
固定沙丘	5	5	4	4	5
半固定沙丘	4	3	4	3	5
流动沙丘	2	3	3	2	4

黄花补血草(*Limonium aureum*)等。2007—2010 年丘间低地和缓平沙坡的物种数相同,共 5 种植物,流动沙丘最少,且不同年份具有的物种数不同;2011 年过渡带的物种数相对前几年来说有所增多,丘间低地的物种数最多,为 7 种,流动沙丘最少,为 4 种。

植被盖度为某物种的植冠投影面积之和除以样地面积获得。本研究分析了全部物种盖度随不同立地条件的变化趋势。黑河中游荒漠绿洲过渡带,随着立地条件的变化,植被盖度有所不同,其中,植被

盖度最高的为丘间低地,多年平均值为 26.73%;流动沙丘的植被盖度最低,多年平均值为 10.08%(图 1)。差异性分析表明:丘间低地和缓平沙坡的植被盖度显著高于半固定沙丘和流动沙丘,固定沙丘显著高于流动沙丘($p<0.05$)。

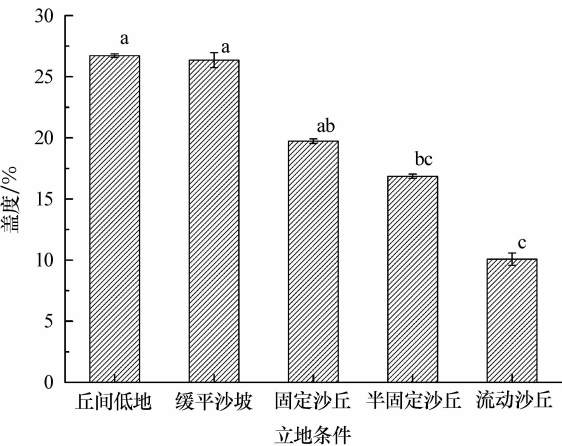


图 1 黑河中游荒漠绿洲过渡带不同立地条件下植被盖度的变化

(图中不同小写字母表示存在显著差异($p<0.05$))

Fig.1 Vegetation coverage changes under different site condition in the middle reaches of Heihe River Basin, the different lowercase letter in figure indicates significant differences

3.3 不同立地条件下物种多样性的变化和排序

以多年植被调查样方的多样性指数平均值作为物种多样性的测度指标,对黑河中游荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性的变化进行了比较(图 2)。随着立地条件的变差,各指数均呈现降低

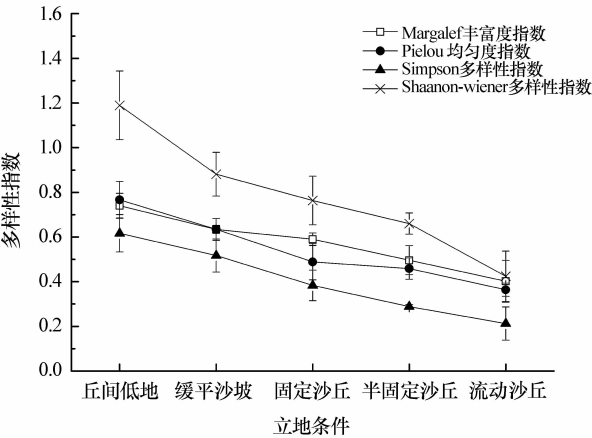


图 2 黑河中游荒漠绿洲过渡带物种多样性指数随着立地条件的变化

Fig.2 Species diversity change under different site condition in the middle reaches of the Heihe River Basin

的趋势。丘间低地条件下的 Margalef、Simpson、Shannon-Wiener、Pielou 指数值均最大,流动沙丘条件下最小。在以上各指数中沿立地条件变化幅度最大的为 Shannon-Wiener 指数,变幅为 0.42~1.19;变幅最小的为 Margalef 指数,为 0.40~0.74。多样性的这种变化趋势,反映出黑河中游荒漠绿洲过渡带随着立地条件的变差,物种多样性、丰富度和均匀度都随之表现出与之相应的递减趋势。

Hill 多样性指数的分析表明,以不同立地条件为环境梯度,物种多样性随着立地条件的变差同样表现出降低的趋势(图 3)。按多样性从高到低的顺序,其相应的立地条件分别为丘间低地、缓平沙坡、固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘。

同时 Hill 指数分析还显示出不同立地条件下物种多样性的变化表现出两个显著特征,第一特征为在丘间低地、缓平沙坡和固定沙丘立地条件下,多样性曲线的走势基本一致,而且随着参数 α 的调整多样性指数变化明显,曲线的响应较灵敏。第二特征为在半固定沙丘和流动沙丘立地条件下,多样性曲线的走势趋于平直化,且随着 α 的调整,多样性指数变化不明显,曲线的响应也不灵敏。因此,就多样性变化与立地条件的关系而言,随着立地条件的变化,土壤水分条件的变差,黑河中游荒漠绿洲过渡带物种多样性开始明显降低。这说明在荒漠绿洲过渡带,由于立地条件的变化,土壤水分的变差,使得一些草本植物根本无法生存,同时过低的水分条件也使部分灌木开始衰退,种类与数量减少。

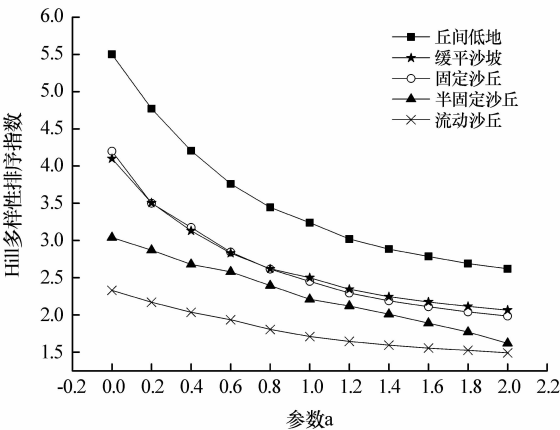


图 3 黑河中游荒漠绿洲过渡带不同立地条件下 Hill 多样性指数排序分析结果

Fig.3 Species diversity change under different site condition in the middle reaches of Heihe River Basin

3.4 植物群落分布与土壤理化因子的关系

用典范对应分析(CCA)分析了荒漠绿洲过渡

带植被分布与主要土壤理化因子的关系。CCA 排序图能够很好地揭示植物种分布与环境梯度之间的关系,图 4 中箭头代表各个土壤理化因子;箭头所处象限代表土壤因子与排序轴间的正负相关性;箭头连线长短代表植物种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。在分析植物种类和土壤因子之间的关系时,可以作 某一植物种与环境因子连线的垂直线,垂直线与环境 因子连线相交点离箭头越近,表示该种与该类环境 因子的正相关性越大,处于另一端的则表示与该类 环境因子具有的负相关性越大^[21]。

CCA 第一、二排序轴表明:土壤含水量和 pH 值 因子的箭头长度明显大于其他环境因子,并且土壤 含水量与第一排序轴的夹角较小(相关系数为 0.6951),说明土壤含水量对荒漠绿洲过渡带植物种 分布有着重要的影响,因此,可以认为 CCA 第一排 序轴是一个土壤含水量梯度变化轴,沿该轴方向土 壤含水量有增加的趋势。pH 值与 CCA 第二排序 轴的夹角较小(相关系数为 0.6889),说明 CCA 第 二排序轴是一个 pH 值梯度变化轴。综上可得,选 取的土壤因子对过渡带植物种分布的影响程度大 小为:土壤含水量>pH 值>全钾>有机质>速效氮 >全氮>速效钾>全磷>土壤盐分>速效磷。

图 4 整体上反映了 7 种植物与 10 种土壤因子之 间的关系,可以看出,梭梭、沙蒿和沙蓬 3 种植物 分布在第二排序轴的左侧,主要受速效磷的影响;盐 生草主要受土壤水分的影响,沙拐枣主要受盐分的 影响;雾冰藜主要受全磷的影响;泡泡刺受全氮的 影响。

CCA 排序的前 3 个轴保留了物种数据总方差的 84.7%。前三轴的物种与环境相关性较高,共解 释了物种-环境关系总方差的 98%(表 3)。这一解 释量是很高的,说明土壤环境因子对荒漠绿洲过渡 带植物分布有较大的影响。Gauch^[22]研究表明如果 前 3 个主要特征向量的方差占总方差的 40%以上, 则排序效果是满意的。因此,只保留 CCA 的前 3 轴,就可以较好地反映荒漠绿洲过渡带植被分布与 土壤因子之间的关系。

4 讨论

物种多样性对于生态系统的功能和稳定起决定 性作用^[23],研究群落物种多样性有助于了解物种 的空间分布规律,能够揭示群落多样性与环境的相 互作用过程^[24]。物种多样性变化与生境紧密相关, 目前对物种多样性变化影响因子的研究已开展了很 多^[25-28],很多学者认为土壤水分在物种多样性分布

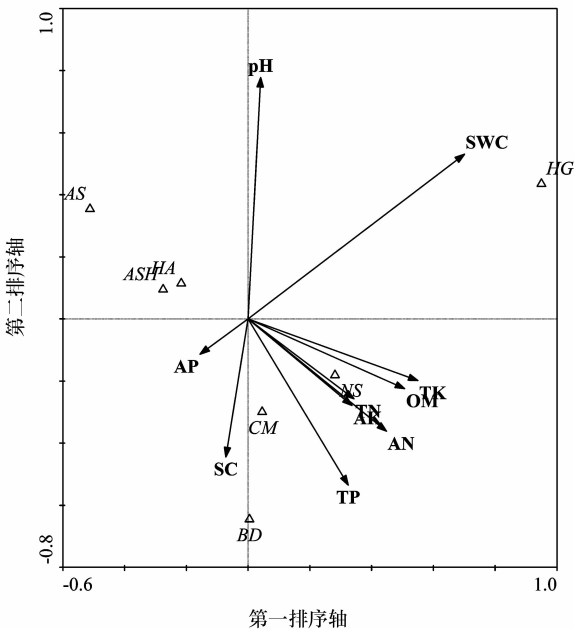


图 4 植物群落与土壤因子典范对应分析的双轴排列图 (HG:盐生草 *H. glomeratus*, AS:沙蓬 *A. squarrosus*, ASH:籽蒿 *A. sphaerocephala*, HA:梭梭 *H. ammodendron*, BD:雾冰藜 *B. dasyphylla*, CM:蒙古沙拐枣 *C. mongolicum*, NS:泡泡刺 *N. sphaerocarpa*, pH:pH 值 pH values, SWC:土壤含水量 Soil water content, TK:全钾含量 Total potassium content, OM:有机质含量 Organic matter content, TN:全氮含量 Total nitrogen content, AN:有效氮含量 Available nitrogen content, TP:全磷含量 Total phosphorus content, SC:盐分含量 Saline content, AP:有效磷含量 Available nitrogen content, AK:有效钾含量 Available potassium content)

Fig. 4 A two-dimensional scatter plot of CCA ordination between plant species and soil factor

表 3 CCA 排序统计结果
Table 3 Statistical results of CCA

	排 序			
	1	2	3	4
特征值	0.471	0.337	0.07	0.016
物种-环境相关性	0.992	0.885	0.886	0.731
物种数据累积百分比方差	45.5	78.0	84.7	86.3
物种-环境关系数	52.6	90.2	98.0	99.8
据累积百分比方差				

格局中具有重要的作用^[29-32]。本研究发现,黑河中游荒漠绿洲过渡带特殊的地理位置和自然条件决定了生态系统的脆弱性和不稳定性,该地区物种组成较为简单,共发现 7 种植物,与同温带其他群落类型多样性^[33-34]相比,物种 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 和 Shannon-Wiener 多样性指数均较低。同时得出,荒漠绿洲过渡带丘间低地的物种多样性指数最高,流动沙丘最低。本研

究区域内,大的气候条件相对一致,立地条件的差异主要体现在土壤水分的变化,因此生物多样性沿立地条件的变化趋势实质上也说明了其沿土壤水分条件的变化趋势,即随着立地条件的变差,土壤含水量也降低,植被所能利用的有效水分减少,使得一些草本植物根本无法生存,同时过低的水分条件也使部分灌木开始衰退,种类与数量减少。

植被分布与土壤环境因子之间的关系已经被广泛研究^[35-36],许多研究证实土壤化学因子是影响植被分布的主要因素^[35,37-38]。在土壤-植被体系中,土壤和植被是相互依存的两个因子,植被影响土壤,土壤制约着植被,土壤环境与植被群落相互联系、相互制约的关系,不但表明了土壤因素在植物群落演替过程中的作用,也揭示了植物群落对土壤性质的恢复和改造作用,这种彼此影响、相互促进的作用是植被恢复演替的动力。本研究中 CCA 分析结果显示,土壤含水量和 pH 值是影响黑河中游荒漠绿洲过渡带植被种类分布的主要因素,原因可能是在黑河中游荒漠绿洲过渡带植物耗水几乎完全依赖土壤供给,其土壤水分也主要依靠大气降水补充,土壤水分就成为影响植被分布的首要环境因子,同时沙地地表水分蒸发强烈,水分蒸发以后,盐分在地表汇集,从而造成地表土壤盐渍化程度较高,土壤溶液的 pH 值较高,进而影响植被的分布。李伟等^[39]通过 CCA 分析发现植物群落物种分布主要受 NO_3^- 、 Mg^{2+} 和氨氮等含量的影响;Kalkhan 等^[40]通过对美国科罗拉多州落基山国家公园外来植物种与土壤环境因子的关系分析得出,土壤氮含量是影响外来植物种丰富度的主要因子;宋创业等^[41]得出地下水位、土壤有机质和全氮含量是影响浑善达克沙地丘间低地植物群落分布的主要影响因子。这说明不同的地理位置和气候条件下,影响植被分布的主要土壤因子不尽相同,因此,今后在黑河中游荒漠绿洲过渡带植被恢复中,应从土壤性质实际出发,考虑采用人工促进植被恢复以及自然恢复植被相结合的手段来进行过渡带植被恢复与保护。

参考文献：

[1] 贾宝全. 新疆生态用水量的初步估算[J]. 生态学报, 2000, 20 (2): 243—250.

[2] 贾宝全, 慈龙骏. 绿洲景观生态研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] Zhang H, Wu J W, Zheng Q H, et al. A preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xin-jiang, China[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55: 545—553.

[4] 山仑, 徐炳成, 杜峰, 等. 陕北地区不同类型植物生产力及生态适应性研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1): 1—7.

[5] Parker A J. The topographic relative moisture index: An approach to soil moisture assessment in mountain terrain[J]. Physical Geography, 1982, 3: 160—168.

[6] Chen Z S, Hsieh C F, Jiang F Y. Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan[J]. Plant Ecology, 1997, 132: 229—241.

[7] McDonald D J, Cowling R M, Boucher C. Vegetation-environment relationships on a species rich coastal mountain range in the fens biome(South Africa)[J]. Vegetatio, 1996, 123: 165—182.

[8] 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 947—952.

[9] He Z B, Zhao W Z, Chang X X. The modifiable areal unit problem of spatial heterogeneity of plant community in the transitional zone between oasis and desert using semivariance analysis[J]. Landscape Ecology, 2007, 22: 95—104.

[10] 彭飞, 王涛, 刘立超, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛堆演代阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 593—599.

[11] 乌云娜, 张风杰, 盐见正卫, 等. 基于幂函数法则对放牧梯度上种群空间异质性的定量分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 689—696.

[12] 李禄军, 蒋志荣, 车克钧, 等. 绿洲-荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 123—127.

[13] 张凯, 冯起, 吕永清, 等. 民勤绿洲荒漠带土壤水分的空间分异研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1149—1155.

[14] 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.

[15] Su P X, Liu X M, Zhang L X, et al. Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ values and gas exchange of assimilating shoots of desert plants *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* with other plants[J]. Israel Journal of Plant Sciences, 2004, 52(2): 87—97.

[16] Hill M O. Diversity and evenness an unifying notation and its consequences[J]. Ecology, 1973, 54: 427—431.

[17] Margalef R. Information theory in ecology[J]. General System, 1957, 3: 37—71.

[18] Pielou E C. Ecological Diversity[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975.

[19] Shannon C E, Weiner W. The mathematical theory of communication. unknown distance function [M]. Urbana: Illinois Press, 1949, 27: 219—246.

[20] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, 163: 688.

[21] Guisan A, Weiss S B, Weiss A D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution [J]. Plant Ecology, 1999, 143: 107—122.

[22] Gauch H G. Multivariate analysis in community ecology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

[23] 赵怀宝, 刘彤, 雷加强, 等. 古尔班通古特沙漠南部植物群落 B 多样性及其解释[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 29—37.

[24] 郝占庆, 于德永, 杨晓明, 等. 长白山北坡植物群落 A 多样性及其随海拔梯度的变化[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 785—789.

[25] Trakhtenbrot A, Kadmon R. Effectiveness of environmental

- cluster analysis in representing regional species diversity[J]. *Conservation Biology*, 2006, 20(4): 1087–1098.
- [26] Araujo M B, Humphries C J, Densham P J, et al. Would environmental diversity be a good surrogate for species diversity[J]. *Ecography*, 2001, 24(1): 103–110.
- [27] Davies R G, Orme C, Webster A J, et al. Environmental predictors of global parrot (Aves: Psittaciformes) species richness and phylogenetic diversity[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(2): 220–233.
- [28] Keller A, Rodel M O, Linsenmair K E, et al. The importance of environmental heterogeneity for species diversity and assemblage structure in Bornean stream frogs[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2009, 78(2): 305–314.
- [29] Levin L A, Etter R J, Rex M A, et al. Environmental influences on regional deep-sea species diversity[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 51–93.
- [30] Dai Y C, Yang Z L, Cui B K, et al. Species diversity and utilization of medicinal mushrooms and fungi in China[J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2009, 11(3): 287–302.
- [31] Nagaike T. A review of ecological studies on the effects of forest management on plant species diversity[J]. *Japanese Journal of Ecology*, 2002, 52(1): 35–54.
- [32] Orlov N L, Sang N N, Cuc H T. Description of a new species and new records of *Rhacophorus* genus (Amphibia; Anura: *Rhacophoridae*) with a review of amphibians and reptiles diversity of Ghu Yang Sin National Park (Dac Lac Province, Vietnam)[J]. *Russian Journal of Herpetology*, 2008, 15(1): 67–84.
- [33] 李新荣, 张新时. 鄂尔多斯高原荒漠化草原与草原化荒漠灌木类群生物多样性的研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(6): 665–669.
- [34] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 等. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 667–673.
- [35] Hook B P, Burke I C, Lauenroth W K. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and opening in North America short grass steppe[J]. *Plant Soil*, 1991, 138: 247–256.
- [36] Kenkel N C, Derksen D A, Thomas A G, et al. Review: Multivariate analysis in weed science research[J]. *Weed Science*, 2002, 50: 281–292.
- [37] 上官铁梁, 贾志力, 张金屯, 等. 汾河太原段河漫滩草地植被的数量分类与排序[J]. *草业学报*, 2001, 10(4): 31–39.
- [38] 张文辉, 卢涛, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 552–559.
- [39] 李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 采砂迹地型湿地恢复过程中植物群落分布与土壤环境因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2325–2331.
- [40] Kalkhan M A, Stafford E J, Woodly P J, et al. Assessing exotic plant species invasions and associated soil characteristics: a case study in eastern Rocky Mountain National Park, Colorado, USA, using the pixel nested plot design[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 622–634.
- [41] 宋创业, 宋柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 40–49.

Species Diversity and Its Relationship with Soil Factor under Different Site Conditions in Desert-oasis Ecotone

XIE Ting-ting^{1,2}, SU Pei-xi^{1,3}, ZHOU Zi-juan^{1,3}, LI Shan-jia^{1,3}, ZHANG Hai-na^{1,3}

(1. Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Heihe Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Vegetation and soil surveys were conducted under different site conditions in 2007–2011 to study species diversity using richness indices, evenness indices and diversity indices, in the middle reaches of Heihe River Basin, meanwhile the relationship between species distribution and soil environmental factors was also studied by the canonical correspondence analysis. The results showed that the vegetation covers and species diversity were the highest in the interdune lowland, they were the lowest in the mobile dune; the result of the Hill's index (diversity ordering) showed the species diversity reduced along with soil water content decreasing, the orders of species diversity was interdune lowland, flat slope, fixed dune, semifixed dune and mobile dune. The degree of influences of soil factors on vegetation distribution was soil water content > pH > total K > organic matter > available N > total N > available K > total P > saline content > available P, soil water content and pH were important factors significantly affecting spatial distribution difference of vegetation, the explanation of environmental was 98%, proof sorting credible.

Key words: desert-oasis ecotone; species diversity; soil factor; canonical correspondence analysis