

• 研究报告 •

艾比湖流域杜加依林荒漠植物群落多样性 及优势种生态位

龚雪伟^{1,2} 吕光辉^{1,3*}

1 (绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

2 (新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

3 (新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 多样性格局的形成是物种间相互作用及其适应环境的结果。为了阐释艾比湖流域荒漠植物的物种多样性及优势种生态位特征, 我们对艾比湖湿地国家级自然保护区内阿其克苏河北岸的杜加依林进行了物种组成与环境因子调查。结果表明: (1)按照土壤水盐含量, 根据多元回归树(multivariate regression tree, MRT)方法可将植被划分为胡杨–罗布麻–芦苇(Ass. *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* – *Phragmites australis*) (I型)、胡杨–琵琶柴(Ass. *Populus euphratica* – *Reaumuria songonica*) (II型)和盐爪爪|胡杨–罗布麻+骆驼刺(Ass. *Kalidium foliatum* | *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* + *Alhagi sparsifolia*) (III型) 3个主要群丛。(2) I型群丛抵御极端环境的能力较差, 包括5个样方, II型群丛能够忍受轻微的盐旱胁迫, 包括3个样方, III型群丛对盐旱生境具有一定的适应性, 包括22个样方; 随着典型群丛从I型演替成为III型, 沙生和盐生植物逐渐占据生境并成为主要优势种, Shannon-Wiener多样性指数(*H*)和Margalef丰富度指数(*Ma*)先降低后增加, Simpson优势度指数(*C*)和Pielou均匀度指数(*E*)先增加后逐渐降低, 体现了杜加依林植物群落的演替序列。(3)生态位宽度Bray-Curtis相似性聚类分析将13个优势种分为2组, 平均相似性分别为96.89%和97.66%, 反映了研究区物种生态位宽度具有较高的相似性; 基于物种多度数据的非度量多维标度排序(NMDS)压力系数为0.04, 除铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)与甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)外, 物种之间的分布也具有较高的相似性。综上所述, 土壤水盐含量是影响艾比湖流域杜加依林中荒漠植物群丛结构及多样性的主要环境因子, 并决定了群落的演替方向; 各优势种之间的生态位和分布具有较高的相似性, 存在明显的竞争关系。

关键词: 荒漠河岸林; 多元回归树; 非度量多维标度排序; 生态位宽度; 生态位重叠

Species diversity and dominant species' niches of eremophyte communities of the Tugai forest in the Ebinur basin of Xinjiang, China

Xuewei Gong^{1,2}, Guanghui Lü^{1,3*}

1 Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi 830046

2 College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046

3 Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046

Abstract: Patterns of species diversity are determined by both species interactions and environmental adaptations. The species composition and environmental factors of the Tugai forest on the north shore of the Aqikesu River was investigated to determine species diversity and the ecological niche of dominant species in the Ebinur basin. Using a multivariate regression tree based on the content of soil water and salinity, our results showed that the plant communities were divided into three associations. The three associations are the Ass. *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* – *Phragmites australis* (type I), the Ass. *Populus euphratica* – *Reaumuria songonica* (type II), and the Ass. *Kalidium foliatum* | *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* + *Alhagi sparsifolia* (type III). Association I had a weak ability to tolerate extreme environments, including 5

收稿日期: 2016-06-23; 接受日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(31560131)

* 通讯作者 Author for correspondence. Email: ler@xju.edu.cn

quadrats, while Association II could tolerate mild salt and drought stress, including 3 quadrats, and Association III had a certain degree of adaptability to salty and dry habitats, including 22 quadrats. With succession of typical associations from type I to III, psammophytes and halophytes gradually occupied the habitats and become the dominant species. The Shannon-Wiener biodiversity index and Margalef richness index initially decreased and then increased along with environmental degradation, while the Simpson dominance index and Pielou evenness index showed the opposite trend. The variation of associations and species diversity along the environmental gradient reflects the succession of plant communities. The Bray-Curtis similarity analysis of niche breadth clustered 13 dominant species into two groups, with an average similarity of 96.89% and 97.66%, respectively, reflecting that the niche breadth of species has a high similarity. The pressure coefficient of non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination was 0.04 and except for *Halimodendron halodendron* and *Glycyrrhiza uralensis*, and species distribution also had a high similarity. In summary, soil water and salt contents are the main environmental factors that are responsible for plant structure and diversity, and determine the direction of succession. The niche and distribution of dominant species show high similarity, indicating obvious competitive relationship between them.

Key words: desert riparian forest; multivariate regression tree; non-metric multidimensional scaling; ecological niche breadth; ecological niche overlap

艾比湖形成于第四纪高山冰雪融水丰沛期,在鼎盛时期,面积为3,000–3,500 km²,水深40 m左右,贮水量700–1,000亿m³,为水质良好的淡水湖(周驰等, 2010)。自更新世起,因冰期结束,气候转暖,入湖水量逐渐减少,汇集于此的河流沿途冲刷挟带大量矿物离子进入湖泊,加之蒸发强烈,目前艾比湖面积已缩减至835 km²,平均水深仅1.4 m左右,是新疆最大的封闭咸水湖(张亚丽等, 2011)。艾比湖流域处于准噶尔盆地西南低洼处和水盐汇集中心,其西北部是著名风口阿拉山口。作为新疆继塔里木河流域之后的第二大干旱生态环境退化区,其面临的主要问题是沙漠化和盐渍化及由此带来的生物多样性和生产力下降,该区已成为我国北部重要的沙尘来源地之一。

艾比湖流域分布有典型的干旱荒漠和沼泽湿地,景观类型多样,生物资源丰富,兼具湿地沼泽生态系统和荒漠生态系统的双重特征,是开展湖泊湿地影响下荒漠生态系统研究的理想场所和天然实验场。艾比湖流域植物区系属古北界蒙新区北疆荒漠亚区准噶尔荒漠小区,在湖滨区和补给河流沿岸分布有大量由荒漠植物组成的天然植物群落——杜加依林(Tugai forest)。杜加依林是干旱荒漠中沿河流分布的以乔木树种为主、伴生灌木和草本的河谷林(田裕钊, 1988),它不仅能够忍耐干旱,还对盐渍化土壤有一定的适应能力,在防风固沙、水源涵养和多样性维持方面具有重要作用,是干旱荒漠中能够天然形成的唯一森林群落类型。

群落物种多样性是群落结构和功能复杂性的量度(Leendertse et al, 1997; Otto et al, 2006),不仅可以反映植物群落与环境之间的相互关系(王丽娟等, 2009),还能揭示群落中物种的丰富度、优势度和均匀度(班卫强等, 2012),因此一直是群落生态学研究的重点和热点(Tilman, 1999)。生态位是一个既抽象又富有内涵的现代生态学重要概念,在研究群落结构和功能、群落内物种关系、生物多样性等方面有重要作用(李显森等, 2013)。生态位宽度反映物种的资源利用能力和适应性,生态位重叠度反映物种之间的资源竞争状态,二者都能反映物种分布的相似性。研究不同群丛间的多样性差异和优势种在不同资源维度上的生态位特征,对揭示各物种在群落中的地位和作用、物种间的相互关系和干旱荒漠区物种多样性维持机制等具有重要意义(谭芮等, 2013)。以往关于艾比湖流域杜加依林植物群落的研究多集中于空间格局(李尝君等, 2013)、点格局(王庭权等, 2015)、种间关联(袁月等, 2008)、数量分类和排序(王合玲等, 2013)等,对于不同荒漠植物群丛类型间植物多样性差异和优势种在不同资源维度上的生态位宽度及生态位重叠缺乏系统研究。

本研究选择艾比湖湿地国家级自然保护区内阿其克苏河北岸杜加依林为研究对象,采用规则取样法调查植物群落与土壤特性,利用多元回归树(multivariate regression tree, MRT)进行群丛分类,分析不同群丛间物种多样性的差异;计算优势种的生态位宽度和生态位重叠指数,将优势种在不同资

源维度上的生态位宽度进行Bray-Curtis相似性聚类,采用非度量多维标度排序(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析不同优势种的分布情况。旨在探讨以下科学问题: (1)哪些土壤因子主导着研究区的植物群丛结构、多样性和群落演替? (2)优势种之间的生态位特征及分布状况反映着怎样的种间关系? 上述问题的回答可为干旱区湖泊湿地的生态保护和植被恢复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地国家级自然保护区(44°30′–45°09′ N, 82°36′–83°50′ E)位于新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州精河县西北,东西长102.63 km,南北宽72.3 km。该流域地处亚欧大陆腹地,在远离海洋和三面高山环列的综合影响下,平原区为典型的温带大陆性干旱气候。年蒸发量1,600 mm以上,年降水量100 mm左右,日照时数约2,800 h,极端最高气温44℃,极端最低气温–33℃,全年大风日数约164 d,最大风速55.0 m/s。复杂的地形和严酷的气候条件使得流域内形成了独特的荒漠–湿地–戈壁复合景观(龚雪伟等, 2016),区内典型地带性土壤类型有灰漠土、灰棕漠土、风沙土,隐域性土壤类型为盐(盐渍化)土、草甸土和沼泽土。植物区系属古北界蒙新

区北疆荒漠亚区准噶尔荒漠小区,代表植物类型包括旱生、沙生、盐生、湿生、水生和短生植物。在湖滨三角洲及入湖河流沿岸分布有杜加依林,主要植物种有胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)和芦苇(*Phragmites australis*)等。

1.2 样方设置及群落调查

野外调查于2014年7月植物生长季内进行。在艾比湖保护区内东大桥管护站以北,垂直于艾比湖补给河流之一的阿其克苏河河岸,设置2 km × 3 km (东西–南北)大样地,将大样地均分为30个400 m × 500 m小样地。在每个小样地中央设置1个30 m × 30 m样方(图1),进行群落调查和样品采集。调查样方中所有物种的种类和多度;记录乔木的高度、冠幅、胸径和枝下高,灌木和草本的丛(株)数、丛幅、高度和盖度。在样方内分别按照裸地土、冠下土挖取土壤剖面(0–50 cm),并将两种类型的土壤用四分法混匀作为该样方的土壤样品,取适量分别装入铝盒和密封袋带回实验室待测。

1.3 土壤样品分析

采用烘干称重法测定含水量,采用残渣烘干法(土水比1:5)测定含盐量,采用酸度计法测定pH值,采用重铬酸钾容量法测定有机质(soil organic matter, SOM)含量。

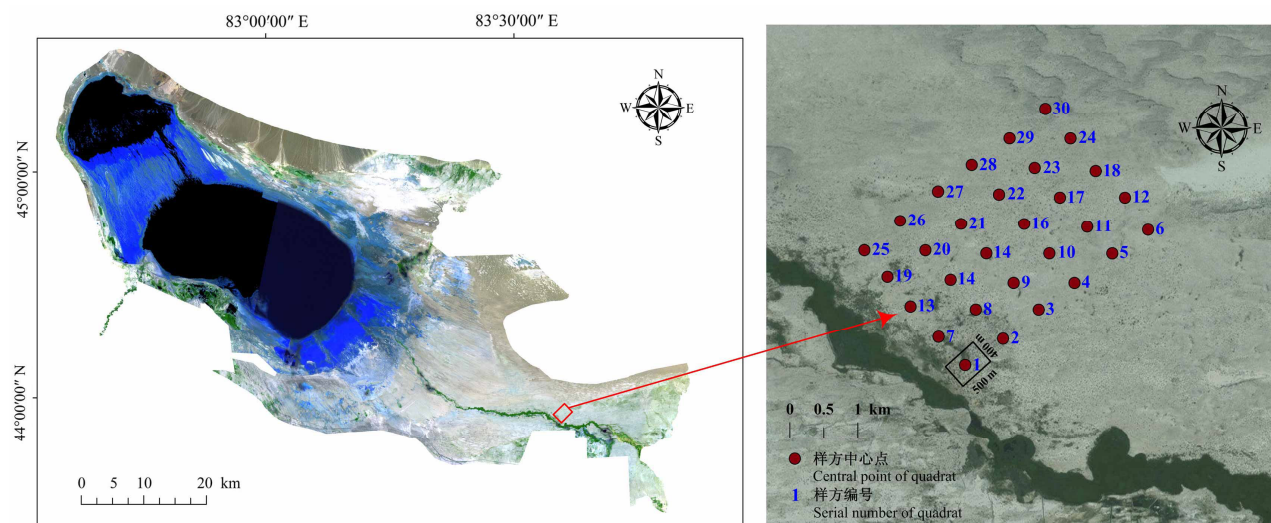


图1 研究区位置及样方布设。左图为艾比湖湿地国家级自然保护区遥感影像图,右图为东大桥管护站附近的样方布设。
Fig. 1 Location of the study area and quadrats setting. The picture on the left shows the remote sensing image of Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve and the picture on the right shows the scheme of quadrats near Dongdaqiao Management and Protection Station.

1.4 物种多样性计算

运用重要值方法计算物种多样性指数、丰富度指数、优势度指数和均匀度指数。乔木的重要值计算公式为: 重要值 = (相对多度+相对频度+相对盖度)/3; 灌木和草本的重要值计算公式为: 重要值 = (相对盖度+相对高度)/2 (张金屯, 2011); 其中: 相对多度 = (某种植物的多度/全部植物的多度之和) × 100%, 相对频度 = (某种植物的频度/全部植物的频度之和) × 100%, 相对盖度 = (某种植物的盖度/全部植物的盖度之和) × 100%, 相对高度 = (某种植物的平均高度/全部植物的平均高度之和) × 100%。多样性指数的计算参照张金屯(2011)的方法。

Shannon-Wiener多样性指数(H):

$$H = -\sum_{i=1}^S N_i \ln N_i \quad (1)$$

Margalef丰富度指数(Ma):

$$Ma = (S-1) / \log_2 N \quad (2)$$

Simpson优势度指数(C):

$$C = \sum_{i=1}^S N_i^2 \quad (3)$$

Pielou均匀度指数(E):

$$E = H / \ln(S) \quad (4)$$

式中, N_i 为群落中物种 i 的重要值, N 为样方中所有物种的个体总数, S 为样方中总的物种数。

1.5 生态位宽度及生态位重叠计算

生态位宽度采用Levins (1968)的方法计算, 生态位重叠采用Pianka (1973)生态位重叠指数:

$$B_i = 1 / r \sum_{k=1}^r P_{ik}^2 \quad (5)$$

$$O_{ij} = \sum_{k=1}^r P_{ik} P_{jk} / \sqrt{\left(\sum_{k=1}^r P_{ik}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^r P_{jk}^2 \right)} \quad (6)$$

式中, B_i 为物种 i 的生态位宽度, O_{ij} 为物种 i 和 j 的生态位重叠指数, P_{ik} 和 P_{jk} 分别为物种 i 和 j 在第 k 个资源等级下(指某一土壤因子的某一资源等级)的重要值占该物种在所有资源等级上的重要值总和的比例, r 为资源等级数。

1.6 多元统计

多元回归树(MRT)是一元回归树的拓展, 作为研究物种分布与环境因子之间关系的数量分类方法, 它将环境因子梯度作为分类节点, 利用递归划

分法, 将样地划分为尽可能同质的类别, 减少样地中群落的差异性, 同时采用交叉验证相对误差(cross validation relative error, CVRE)来确定分类结果, 能很好地反映异质环境下群落的结构特征, 比常用数量方法更客观(赖江山等, 2010)。本研究采用30个样方的土壤含水量、含盐量、pH值和SOM含量为自变量, 植物在样地内的重要值为因变量进行群落分类。MRT采用R软件(<http://cran.rproject.org>) mvpart程序包中的mvpart函数进行运算。

使用优势种的物种-生态位宽度矩阵进行Bray-Curtis相似性聚类, 按其生态位宽度特征分组归类。通过物种多度数据的非度量多维标度排序分析优势种的分布情况, 以压力系数(stress)表示相似性等级与标序图中相应的距离等级不一致程度: stress < 0.05为吻合极好; stress < 0.1为吻合较好; stress < 0.2为吻合一般; stress > 0.3为吻合较差(李显森, 2013)。生态位宽度Bray-Curtis相似性聚类和多度NMDS分析均在PRIMER 7 (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research, Plymouth Marine Laboratory)中完成。

2 结果

2.1 植物群落调查结果

野外调查共记录到植物17种, 其中藜科占比最高, 达30%, 为优势科。剔除4种偶见种后, 仅剩13个物种, 物种组成较为单一; 按植物生长型计, 乔木1种, 小乔木2种, 灌木3种, 半灌木4种, 草本3种。13个优势种分别为胡杨、梭梭、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、琵琶柴(*Reaumuria songonica*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、白刺、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、罗布麻、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、芦苇和甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)。基于CVRE值最小代表预测能力最佳的原则, MRT按照环境变量将30个样方划分为3个群丛(图2), 其中pH值和SOM含量未被纳入, 说明研究区的植被分布主要受到土壤水盐含量影响。根据《中国植被》(吴征镒, 1980)中的分类和命名方法, 命名结果如下:

I. 胡杨-罗布麻-芦苇群丛(Ass. *Populus euphratica* - *Apocynum venetum* - *Phragmites australis*), 包括1、2、7、8和14共5个样方, 该类型群

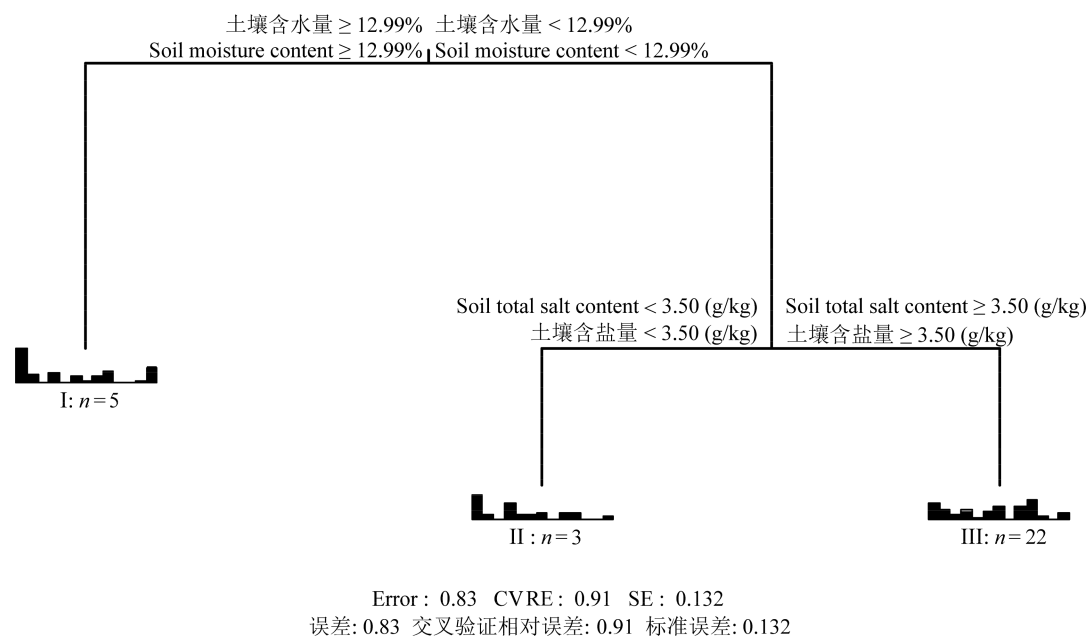


图2 群丛分类多元回归树。柱状图代表物种平均重要值, n 表示所包含的样方个数。
Fig. 2 Multivariate regression tree for associations classification. The columns represent the importance values of the species and n refers to the amount of quadrats included.

丛分布在近河岸带, 土壤含水量 $\geq 12.99\%$ 。主要伴生种为白刺。

II. 胡杨-琵琶柴群丛(Ass. *Populus euphratica* – *Reaumuria songonica*), 包括24、29和30共3个样方, 该类型群丛多分布在距河岸较远处, 土壤含水量 $< 12.99\%$ 、土壤含盐量 < 3.50 g/kg的生境, 具有一定的耐旱耐盐能力, 主要伴生种包括梭梭和花花柴。

III. 盐爪爪||胡杨-罗布麻+骆驼刺群丛(Ass. *Kalidium foliatum* || *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* + *Alhagi sparsifolia*), 包括3–6、9–13、15–23和25–28共22个样方, 该类型群丛为艾比湖流域杜加依林中的主要荒漠植物群丛, 在研究区分布广泛, 其生境土壤含水量 $< 12.99\%$ 、土壤含盐量 ≥ 3.50 g/kg, 耐旱耐盐能力较强。主要伴生种包括盐节木、梭梭、白刺、琵琶柴和芦苇。

2.2 群落多样性特征

研究区物种多样性指数 H 介于0.987–1.956之间, 丰富度指数 Ma 介于0.331–1.536之间, 优势度指数 C 介于0.136–0.397之间, 均匀度指数 E 介于0.748–0.979之间。MRT分类结果对应着环境因子的变化, 随着I型群丛到III型群丛的演替, 土壤含水量逐渐下降, 而含盐量却不断增加, 表明环境条件逐渐恶化。随着环境胁迫程度的增加, 对3种群丛类型

的物种多样性进行比较, 发现 H 和 Ma 均呈现先下降后增加的趋势(图3A, B); 而 C 和 E 则表现为先增加后下降的趋势(图3C, D)。

2.3 优势种生态位宽度

30个样方土壤因子的分析结果表明, 土壤含水量的变化范围为2.09–17.58%, 均值为 $9.98 \pm 0.73\%$, 标准差为4.02, 变异系数为40.28%; 土壤含盐量的变化范围为0.70–7.06 g/kg, 均值为 4.22 ± 0.22 g/kg, 标准差为1.23, 变异系数为29.15%; 土壤pH值的变化范围为8.25–9.03, 均值为 8.52 ± 0.03 , 标准差为0.15, 变异系数为1.76%; SOM含量的变化范围为0.68–11.19 g/kg, 均值为 3.67 ± 2.31 g/kg, 标准差为2.32, 变异系数为63.22%。根据土壤指标的测试结果, 将每个指标按照一定的梯度划分为8个等级(表1), 其中土壤含水量因变化范围相对较小, 只划分为6个等级。

优势种生态位宽度计算结果(表2)表明, 罗布麻、琵琶柴、白刺、胡杨、梭梭和怪柳具有较高的水分维度生态位宽度值, 而盐节木的水分维度生态位宽度显著低于其他物种。白刺、胡杨、芦苇、盐爪爪和骆驼刺的盐分维度生态位宽度值较大, 怪柳的盐分维度生态位宽度最小。骆驼刺、白刺、盐爪爪、琵琶柴和罗布麻具有较高的pH维度生态位宽

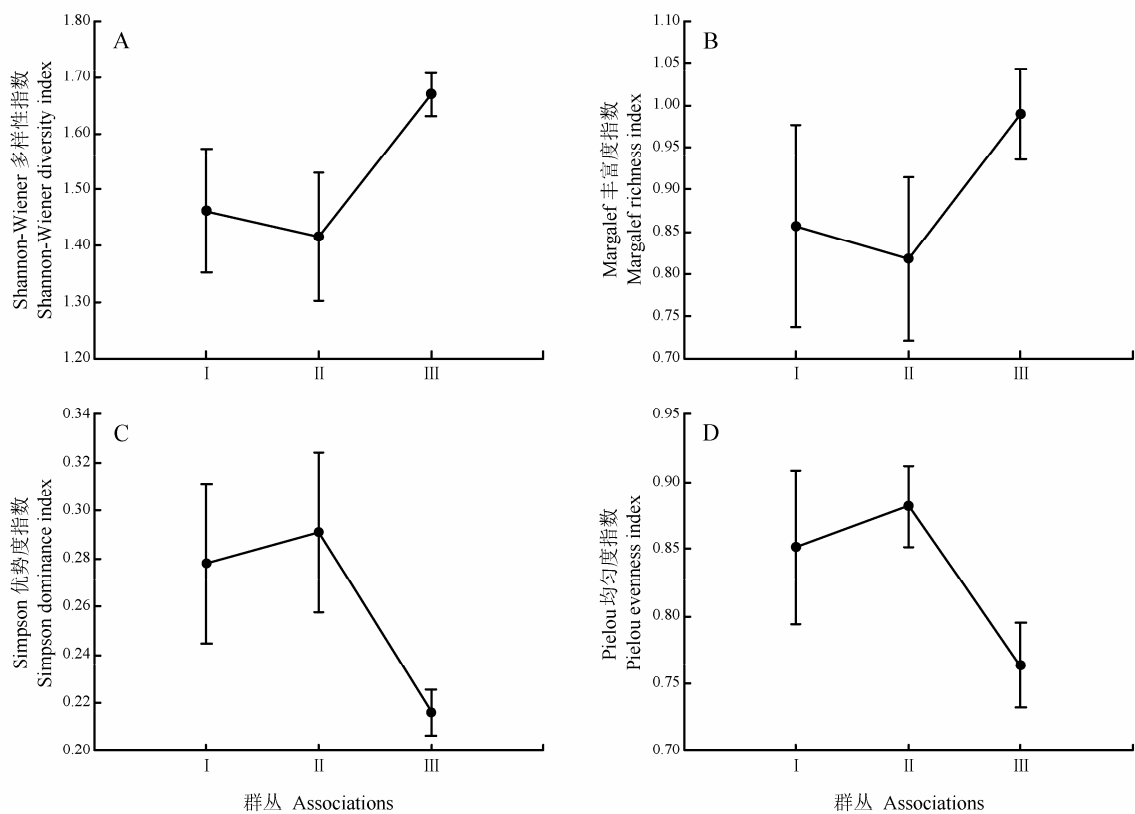


图3 不同群丛的物种多样性。I为胡杨-罗布麻-芦苇群丛, II为胡杨-琵琶柴群丛, III为盐爪爪|胡杨-罗布麻+骆驼刺群丛。
Fig. 3 Species diversity of different associations. Association I: Ass. *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* – *Phragmites australis*, Association II: Ass. *Populus euphratica* – *Reaumuria songonica*, and Association III: Ass. *Kalidium foliatum* | *Populus euphratica* – *Apocynum venetum* + *Alhagi sparsifolia*.

表1 土壤因子梯度等级划分。相邻等级中相同的值划入低等级。
Table 1 Resource gradients division of soil factors. The same values in adjacent grades are assigned to the lower grade.

土壤因子 Soil factors	资源梯度等级 Resource gradient grade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
含水量 Water content (%)	2.0–4.0	4.0–7.0	7.0–10.0	10.0–13.0	13.0–16.0	16.0–19.0	–	–
含盐量 Salt content (g/kg)	0.00–1.00	1.00–2.00	2.00–3.00	3.00–4.00	4.00–5.00	5.00–6.00	6.00–7.00	7.00–8.00
pH	8.25–8.34	8.34–8.44	8.44–8.54	8.54–8.64	8.64–8.74	8.74–8.84	8.84–8.94	8.94–9.04
土壤有机质 Soil organic matter (g/kg)	0.00–1.00	1.00–2.00	2.00–3.00	3.00–4.00	4.00–5.00	5.00–6.00	6.00–7.00	7.00–8.00

度, 但铃铛刺的pH维度生态位宽度较小。罗布麻、白刺、胡杨和琵琶柴具有较高的SOM维度生态位宽度, 骆驼刺的SOM维度生态位宽度最小。总的来说, 同一资源维度上不同物种的生态位宽度存在差异, 同一物种在不同资源维度上的生态位宽度也存在差异, 其中胡杨和白刺在各资源维度均具有较高的生态位宽度值, 而盐节木在各资源维度的生态位宽度值均较低。

为了探究物种间生态位宽度的总体特征及相

似性, 通过物种生态位宽度Bray-Curtis相似性指数聚类分析, 将13个优势种分为2组: 第1组包括盐节木、芦苇、骆驼刺和盐爪爪, 第2组包括花花柴、铃铛刺、甘草、胡杨、白刺、琵琶柴、梭梭、罗布麻和怪柳(图4)。其中, 第1组成员的生态位宽度较窄, 平均相似性为96.89%; 第2组成员的生态位宽度相对较宽, 平均相似性为97.66%。2个种组的平均生态位宽度均超过96%, 高的接近98%, 说明研究区优势种的生态位宽度具有较高的相似性。

表2 优势种生态位宽度
Table 2 Ecological niche breadth of dominant species

编号 No.	优势种 Dominnant species	水分维度 Water dimension	盐分维度 Salt dimension	pH维度 pH dimension	土壤有机质维度 Soil organic matter dimension
1	胡杨 <i>Populus euphratica</i>	0.536	0.455	0.414	0.437
2	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	0.531	0.335	0.304	0.348
3	怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	0.480	0.210	0.236	0.276
4	琵琶柴 <i>Reaumuria songonica</i>	0.724	0.388	0.452	0.412
5	花花柴 <i>Karelinia caspica</i>	0.354	0.317	0.377	0.251
6	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	0.611	0.535	0.492	0.476
7	骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	0.390	0.422	0.497	0.189
8	铃铛刺 <i>Halimodendron halodendron</i>	0.329	0.246	0.211	0.299
9	罗布麻 <i>Apocynum venetum</i>	0.898	0.383	0.433	0.536
10	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	0.367	0.427	0.468	0.221
11	盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	0.186	0.245	0.325	0.234
12	甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	0.333	0.250	0.250	0.250
13	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0.316	0.448	0.342	0.246

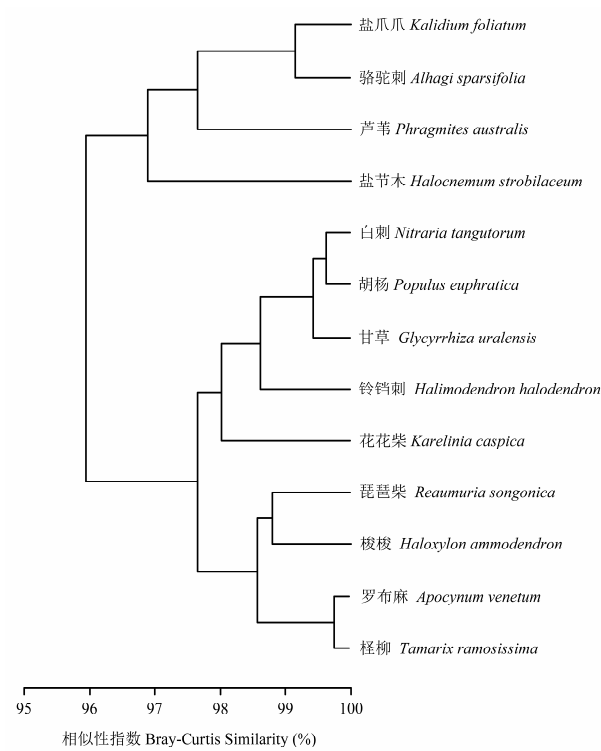


图4 优势种生态位宽度Bray-Curtis相似性聚类分析
Fig. 4 Bray-Curtis similarity clustering analysis of niche breadth of dominant species

2.4 优势种生态位重叠

由表3可见，在水分维度上，盐爪爪与盐节木的生态位重叠值最高，为0.991，怪柳与琵琶柴，铃铛刺与罗布麻，铃铛刺与芦苇，盐爪爪与花花柴的

重叠值最低，都为0。而铃铛刺的水分维度生态位较为特殊，只与怪柳、白刺和花花柴的重叠值较高，与其他物种的重叠值都不高。琵琶柴与骆驼刺、花花柴和白刺在盐分维度上的生态位重叠值较高，分别为0.992、0.981和0.945，骆驼刺与花花柴的重叠值也较高，为0.982；甘草、胡杨与其他种的生态位重叠值较低，其中怪柳与甘草和胡杨的盐分维度生态位重叠值最低，分别为0.245和0.343 (表3)。

pH维度上，怪柳与梭梭的生态位重叠值为0.975，罗布麻、琵琶柴与其他种的生态位重叠值较高；盐节木与其他种的生态位重叠值最低，其中与胡杨、铃铛刺、白刺重叠值分别为0.080、0.093和0.302，此外胡杨与骆驼刺的重叠值也较低，为0.230 (表4)。SOM维度上，花花柴、罗布麻和盐爪爪与其他优势种之间的生态位重叠值较高，其中盐爪爪与骆驼刺之间的重叠值达到0.995；铃铛刺与其他优势种之间的生态位重叠值较低，与花花柴、盐节木、怪柳和骆驼刺之间的重叠值分别为0.000、0.000、0.061和0.099 (表4)。生态位重叠值分布格局分析表明，不同维度生态位重叠值超过0.6的种对分别占有所有种对的62.82%、75.64%、71.79%和52.56%，而低于0.2的分别占6.41%、0.00%、2.56%和10.25%，说明物种在水、盐、pH和SOM这4个维度都具有较高的生态位重叠度。

样方内物种多度数据的NMDS压力系数为0.04 (图5)，吻合极好。除铃铛刺和甘草与其他物种之间

表3 优势种生态位水分和总盐维度重叠值

Table 3 Ecological niche overlaps between dominant species on soil water and total salinity dimension

编号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		0.783	0.343	0.502	0.406	0.735	0.484	0.656	0.808	0.460	0.448	0.874	0.940
2	0.941		0.544	0.665	0.592	0.785	0.647	0.702	0.801	0.636	0.580	0.731	0.892
3	0.684	0.805		0.922	0.882	0.851	0.887	0.792	0.722	0.810	0.793	0.245	0.602
4	0.898	0.911	0.000		0.981	0.945	0.992	0.715	0.748	0.937	0.911	0.499	0.836
5	0.305	0.638	0.707	0.965		0.878	0.982	0.576	0.619	0.909	0.955	0.474	0.803
6	0.962	0.597	0.815	0.800	0.953		0.929	0.828	0.891	0.884	0.819	0.645	0.935
7	0.372	0.987	0.240	0.985	0.871	0.508		0.664	0.717	0.962	0.898	0.484	0.818
8	0.280	0.119	0.743	0.279	0.938	0.880	0.380		0.961	0.669	0.467	0.420	0.671
9	0.456	0.742	0.597	0.636	0.763	0.466	0.670	0.000		0.738	0.526	0.61	0.838
10	0.284	0.779	0.476	0.975	0.000	0.731	0.943	0.604	0.716		0.765	0.436	0.759
11	0.767	0.819	0.288	0.883	0.317	0.715	0.861	0.564	0.779	0.991		0.590	0.865
12	0.728	0.420	0.693	0.878	0.732	0.798	0.902	0.569	0.751	0.805	0.693		0.968
13	0.450	0.339	0.733	0.274	0.961	0.832	0.322	0.000	0.320	0.831	0.366	0.671	

主对角线以下是优势种在水分维度的生态位重叠值矩阵, 主对角线以上是优势种在盐分维度的生态位重叠值矩阵。编号含义见表2。
Values under the main diagonal were the niche of dominant species in water dimension, and those above the main diagonal were the niche of dominant species in salt dimension. See Table 2 for the meaning of code numbers.

表4 优势种生态位pH值和有机质维度重叠值

Table 4 Ecological niche overlaps between dominant species on pH value and organic matter dimension

编号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		0.446	0.391	0.436	0.355	0.726	0.351	0.488	0.578	0.344	0.140	0.790	0.929
2	0.343		0.910	0.981	0.888	0.887	0.903	0.391	0.893	0.927	0.479	0.619	0.301
3	0.487	0.975		0.921	0.991	0.799	0.913	0.061	0.804	0.939	0.512	0.648	0.314
4	0.325	0.763	0.778		0.909	0.870	0.888	0.360	0.906	0.922	0.622	0.605	0.303
5	0.398	0.777	0.848	0.906		0.736	0.941	0.000	0.804	0.962	0.582	0.676	0.322
6	0.375	0.647	0.691	0.879	0.857		0.684	0.535	0.816	0.716	0.301	0.639	0.518
7	0.230	0.892	0.842	0.804	0.748	0.663		0.099	0.846	0.995	0.538	0.751	0.360
8	0.705	0.694	0.799	0.843	0.953	0.865	0.570		0.546	0.113	0.000	0.164	0.258
9	0.357	0.919	0.949	0.861	0.909	0.852	0.889	0.846		0.857	0.548	0.724	0.487
10	0.283	0.756	0.743	0.973	0.819	0.815	0.863	0.714	0.833		0.576	0.718	0.329
11	0.080	0.314	0.216	0.564	0.335	0.302	0.669	0.093	0.340	0.694		0.373	0.195
12	0.522	0.928	0.980	0.835	0.921	0.780	0.792	0.902	0.959	0.768	0.679		0.878
13	0.487	0.497	0.587	0.690	0.770	0.935	0.518	0.809	0.779	0.612	0.870	0.687	

主对角线以下是优势种在pH维度的生态位重叠值矩阵, 主对角线以上是优势种在SOM维度的生态位重叠值矩阵。编号含义见表2。
Values under the main diagonal were the niche of dominant species in pH dimension, and those above the main diagonal were the niche of dominant species in SOM dimension. See Table 2 for the meaning of code numbers.

的分布相似性普遍较低外, 其他物种之间的分布关系具有较高的相似性, 尤其是梭梭、白刺、骆驼刺、琵琶柴、罗布麻和盐爪爪与胡杨和芦苇的分布关系高度相似。

3 讨论

3.1 植物群落分类及物种多样性

植物群落的物种组成沿环境梯度呈现连续变化, 无明显界限, 因此根据植物群落本身的特征进

行群落划分难度很大(陈云等, 2014)。群落分类要求同一类型群落的物种组成和结构相对一致, 相应地, 群落所占据的生境也是进行群落分类的重要参考指标。本文采用4种环境因子进行MRT分类的结果表明, 可按照土壤水盐含量的变化将30个样方分成3类, 每个群丛类型有着不同的物种组成和环境因子。I型群丛占据土壤含水量 $\geq 12.99\%$ 的生境, II型群丛占据土壤含水量 $< 12.99\%$ 、土壤含盐量 $< 3.50\text{ g/kg}$ 的生境, 但以上2种群丛类型包含的样方

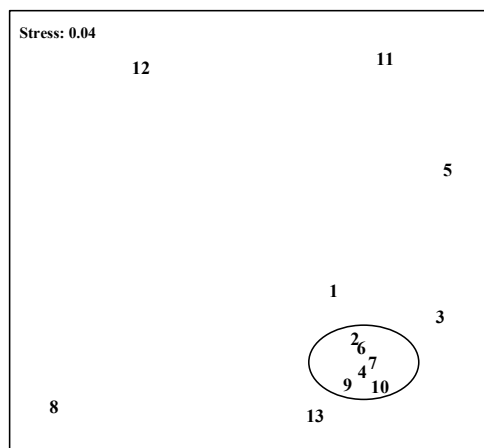


图5 优势种生态位重叠非度量多维标度排序图。编号含义见表2。

Fig. 5 Non-metric multidimensional scaling plot of niche overlap of the dominant species. See Table 2 for the meaning of code numbers.

均较少。而能够占据土壤含水量 $< 12.99\%$ 、土壤含盐量 $\geq 3.50 \text{ g/kg}$ 生境的III型群丛包含的样方最多,说明艾比湖流域杜加依林中的植物群落普遍具有耐旱耐盐的特性。这是因为杜加依林中分布的荒漠植物基本属于旱生、沙生和盐生植物类型,这些植物本身具有一定抵御水盐胁迫的能力。

沿用我国普遍采用的联名法对上述3种群丛命名,不同层之间的优势种以“-”相连,当某一层具有共优种时以“+”相连(牛翠娟等, 2007)。本研究所选区域位于阿其克苏河北岸,该类型杜加依林的主要建群种是胡杨。I和II型群丛的第一优势种及III型群丛乔木层优势种均是胡杨,这是因为胡杨属旱中生乔木,它在长期的生长发育过程中经受了中生生态型到旱生生态型的进化过程,具有较强的抗干旱、耐盐碱、抗风沙、耐腐蚀的生物生态特性(刘加珍等, 2004)。此外,胡杨作为干旱荒漠区唯一的高大乔木,其产生的肥岛效应、水分再分配和保育遮荫作用可以提高荒漠植物多样性(张雪妮等, 2013)。III型群丛是研究区最主要的群丛类型,适应干旱和盐渍化能力强,优势种盐爪爪是典型的真(稀)盐生植物,其叶片退化为同化枝,是荒漠灌丛的建群种及盐生荒漠的指示种。

同一气候背景下的植物群落物种多样性特征主要由生境异质性决定,尤其是在小尺度上,生境差异是形成群落生物多样性的主要原因(汪殿蓓等,

2001)。本研究发现,随着土壤含水量下降和含盐量上升,植物群丛逐渐由I型向III型过渡,在这个过程中,物种多样性指数(H)和丰富度指数(Ma)先下降后升高(图3A, B),这与其他学者认为的干旱区物种多样性指数与丰富度指数随干旱加剧、盐渍化程度增强而逐渐降低的结论不一致(杜泉滢等, 2007; 赵学春等, 2014)。这可能是因为在本研究中I型群丛包含的样方主要出现在距离河岸较近的区域,这一区域内土壤含水量相对较高,除建群种胡杨外,生境主要由对含水量要求较高的克隆湿地植物芦苇和罗布麻占据。克隆植物同一基株的不同分株之间通常由横生结构(匍匐茎、根茎和地上茎)相互连接在一起,并通过横生结构进行水分生理整合,充分利用水资源(朱志玲等, 2006),导致其他物种难以进入,所以水分条件较好时(I型群丛)物种多样性和丰富度偏低。与河岸距离增大时,当土壤含水量逐渐下降至 12.99% 以下,原本对土壤水分要求较高的物种逐渐消失,导致II型群丛物种多样性和丰富度指数比I型群丛低。随着与河岸距离不断增加,盐渍化程度增强,众多盐生植物如盐爪爪、琵琶柴和骆驼刺等开始替代沙生植物,成为群落的主要优势种,物种多样性和丰富度逐渐提高(III型群丛),这与马玉等(2015)认为土壤盐分增加时会驱动物种多样性和丰富度升高的结论一致。说明研究区植物对盐渍化程度的适应性较强。土壤水分的减少导致群丛类型由I型向II型群丛演替,耐受水分胁迫能力弱的物种被淘汰,优势种的地位更加突出,物种优势度升高(图3C);而后,土壤盐分的增加主导了群落演替的方向,物种多样性的增加可能是造成优势种优势地位不明显、总体物种优势度下降的原因。此外,克隆植物之间通过横生结构相互连接,大部分呈聚集分布(李尝君等, 2013),而盐生植物对生境的选择造成物种大多呈斑块状分布(赵振勇等, 2007),以上两种原因造成了I型和III型群丛均匀度指数较低(图3D)。

植物生长受到土壤因子影响。在土壤水盐序列上,当盐旱程度超出植物的生态幅后,其生长将受到限制,导致其他植物入侵和存活,引起物种更迭,群落将发生演替。已有大量学者应用空间替代时间的思路,基于对现存植物群落的空间分布及其土壤属性的调查,研究了土壤因子变化对群落演替的驱动作用,并认为土壤水盐含量是影响植物群落演替

的重要因素(宫兆宁等, 2009; 杨帆等, 2013)。本文MRT分类仅将4种土壤因子中的土壤水盐含量纳入回归树, 不同土壤水盐含量对应着不同的群丛类型及物种多样性格局, 说明土壤水盐是影响群丛结构与物种多样性的主要因子。群落分类结果表明, 随着土壤含水量的下降与含盐量的升高, 旱生群丛逐渐向沙生群丛和盐生群丛演替, 对应的生境也由荒漠河岸林转变为盐生荒漠, 说明土壤水盐也是研究区植物群落演替的主要驱动因子, 并决定着群落的演替方向。

3.2 优势种生态位宽度及生态位重叠

生态位宽度既是衡量物种对环境资源利用状况的尺度, 也反映了物种在栖息地中的地位 and 它们的分布状况, 在一定程度上, 数值越高表示该物种分布越均匀(李显森等, 2013)。本研究中胡杨和白刺在4种资源维度上都具有较高的生态位宽度, 说明这些种对研究区的环境适应较好, 分布较为广泛。而各个资源维度上盐节木的生态位宽度都较小, 这说明盐节木在研究区的分布具有选择性, 仅能适应相对独特的生境。以上结论与实际调查结果相符, 胡杨和白刺分别作为杜加依林和盐生灌丛的建群种, 在研究区分布广泛, 并在不同群丛中均有一定的优势地位; 盐节木作为盐生荒漠的指示种, 在野外调查中仅出现在III型群丛的样方中。将4个资源维度的物种生态位宽度作为输入变量, 利用Bray-Curtis相似性聚类分析可将物种分为2组, 第1组包含的物种均具有较窄的生态位宽度, 说明这些植物在该区域的空间分布不均匀, 适宜的生境少, 更倾向于特化种。第2组包含的物种生态幅较宽, 具有较强的资源利用能力和环境适应能力, 在研究区各种生境条件下均能很好地生长, 在植物群落构建中起着重要作用, 从分布上看, 这些物种的数量较多, 出现频率高, 更倾向于泛化种。

生态位重叠体现了物种对同等级资源的利用程度以及空间配置关系, 反映了物种之间对资源利用的相似程度和竞争关系(Spies, 1990)。较高的生态位重叠意味着物种之间对环境资源具有相似的要求, 因而可能存在激烈竞争; 也有学者认为, 生态位重叠并不一定会导致竞争; 资源丰富时生态位重叠度只表明两个物种因生态相似性而占据了相近的生态空间(霍红等, 2013)。艾比湖流域地处内陆干旱荒漠区, 各种资源匮乏, 复杂的生态关系使各物

种的生态位通常不表现为离散, 而是倾向于分享其他物种的基础生态位, 结果导致两个或更多的物种对某些资源的共同需求, 使不同物种的生态位之间常处于不同程度的重叠状态(张伟等, 2011)。基于物种多度数据的NMDS结果显示, 除铃铛刺与甘草之外, 其他种之间在空间分布上具有一定的相似性, 这也说明研究区物种之间存在明显的竞争关系, 在一定程度上支持上述结论。铃铛刺(盐豆木)的分布与其他种有一定差异, 这与王合玲等(2011)认为盐豆木与研究区其他种的种间关系多表现为负关联保持一致。甘草与研究区其他植物的种间关系多表现为负联结, 可能是因为其分泌物具有化感作用, 造成与其他种在空间分布上的差异(袁月等, 2008)。

本文研究结果表明, 与土壤pH值和有机质含量相比, 土壤水盐含量是影响艾比湖流域杜加依林荒漠植物群落结构与组成的主要影响因子, 按照土壤水盐胁迫程度的不同, 可将植物分为3个主要群丛。环境胁迫强度的逐渐增加导致物种更替发生, 群丛发生演替的同时物种多样性也在不断变化。优势种生态位宽度的高度相似性和较高的生态位重叠值均表示研究区物种之间在栖息地选择上具有较高的一致性, 相互之间存在明显的竞争关系。

致谢: 绿洲生态教育部重点实验室硕士研究生曹靖、王庭权、赵晓英、刘志东和刘薇在群落调查中给予帮助, 两位匿名审稿专家为论文修改提供宝贵意见, 在此一并表示感谢。

参考文献

- Ban WQ, Yan C, Yin LK, Yang ML, Wang ZC (2012) Plant species diversity and dominance population niche characteristics at different sites in southern Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 32, 1632–1638. (in Chinese with English abstract) [班卫强, 严成, 尹林克, 杨美琳, 王忠臣 (2012) 古尔班通古特沙漠南缘不同立地条件植物多样性和优势种群生态位特征研究. *中国沙漠*, 32, 1632–1638.]
- Chen Y, Wang HL, Han JW, Wei BL, Jia HR, Ye YZ, Yuan ZL (2014) Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaoqinling. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2068–2075. (in Chinese with English abstract) [陈云, 王海亮, 韩军旺, 韦博良, 贾宏汝, 叶永忠, 袁志良 (2014) 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局. *生态学报*, 34, 2068–2075.]
- Du QY, Li Z, Liu SR, Liu HY (2007) Dynamics of species di-

- versity and characteristics of halophytic plant communities around saline lakes in arid and semi-arid regions of Inner Mongolia. *Biodiversity Science*, 15, 271–281. (in Chinese with English abstract) [杜泉滢, 李智, 刘书润, 刘鸿雁 (2007) 干旱、半干旱区湖泊周围盐生植物群落的多样性格局及特点. *生物多样性*, 15, 271–281.]
- Gong XW, Lü GH, Ran QY, Yang XD (2016) Response of vegetative growth and biomass allocation of *Lappula semi-glabra* seedlings to dew gradient. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 2257–2263. (in Chinese with English abstract) [龚雪伟, 吕光辉, 冉启洋, 杨晓东 (2016) 狭果鹤虱幼苗营养生长和生物量分配对凝结水梯度的响应. *应用生态学报*, 27, 2257–2263.]
- Gong ZN, Zhao WJ, Hu D (2009) Plant community characteristics and ecological succession model in Yeyahu Wetland under water and salt gradients. *Progress in Natural Science*, 19, 1272–1280. (in Chinese with English abstract) [宫兆宁, 赵文吉, 胡东 (2009) 水盐环境梯度下野鸭湖湿地植物群落特征及其生态演替模式. *自然科学进展*, 19, 1272–1280.]
- Huo H, Feng Q, Su YH, Si JH, Xi HY, Yu TF (2013) Interspecies relations and niche analysis on phytocoenosis in the Ejina oasis. *Journal of Desert Research*, 33, 1027–1033. (in Chinese with English abstract) [霍红, 冯起, 苏永红, 司建华, 席海洋, 鱼腾飞 (2013) 额济纳绿洲植物群落种间关系和生态位研究. *中国沙漠*, 33, 1027–1033.]
- Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) Numerical classification of associations in subtropical evergreen broad-leaved forest based on multivariate regression trees—a case study of 24 hm² Gutianshan forest plot in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 761–769. (in Chinese with English abstract) [赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平 (2010) 基于多元回归树的常绿阔叶林群丛数量分类——以古田山24公顷森林样地为例. *植物生态学报*, 34, 761–769.]
- Leendertse PC, Roozen AJM, Rozema J (1997) Long-term changes (1953–1990) in the salt marsh vegetation at the Boschplaat on Terschelling in relation to sedimentation and flooding. *Plant Ecology*, 132, 49–58.
- Levins R (1968) *Evolution in Changing Environments: Some Theoretical Explorations*. Princeton University Press, Princeton.
- Li CJ, Lü GH, Gong L, Zhang HF, Liu XX (2013) Spatial point pattern and response of clonal plant communities to high drought and salt stress in the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, China. *Arid Zone Research*, 30, 122–128. (in Chinese with English abstract) [李尝君, 吕光辉, 贡璐, 张海峰, 刘晓星 (2013) 艾比湖湿地自然保护区克隆植物群落空间格局及其对水盐胁迫的响应. *干旱区研究*, 30, 122–128.]
- Li XS, Yu ZH, Sun S, Jin XS (2013) Ecological niche breadth and niche overlap of dominant species of fish assemblage in Yangtze River estuary and its adjacent waters. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 2353–2359. (in Chinese with English abstract) [李显森, 于振海, 孙珊, 金显仕 (2013) 长江口及其毗邻海域鱼类群落优势种的生态位宽度与重叠. *应用生态学报*, 24, 2353–2359.]
- Liu JZ, Chen YN, Zhang YM (2004) Niche characteristics of plants on four environmental gradients in middle reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 549–555. (in Chinese with English abstract) [刘加珍, 陈亚宁, 张元明 (2004) 塔里木河中游植物种群在四种环境梯度上的生态位特征. *应用生态学报*, 15, 549–555.]
- Ma Y, Lü GH, He XM, Zhang XN (2015) Responses of plant diversity and soil factors driving to soil salinity in wetland of Ebinur Lake. *Guangdong Agricultural Sciences*, 42(11), 141–147. (in Chinese with English abstract) [马玉, 吕光辉, 何学敏, 张雪妮 (2015) 盐梯度下艾比湖湿地植物多样性响应及土壤因子驱动研究. *广东农业科学*, 42(11), 141–147.]
- Niu CJ, Lou AR, Sun RY, Li QF (2007) *Foundations in Ecology*, 2nd edn. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳, 李庆芬 (2007) 基础生态学 (第二版). 高等教育出版社, 北京.]
- Otto R, Krüsi BO, Burga CA, Fernández-Palacios JM (2006) Old-field succession along a precipitation gradient in the semi-arid coastal region of Tenerife. *Journal of Arid Environments*, 65, 156–178.
- Pianka ER (1973) The structure of lizard communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 53–74.
- Spies TA (1990) Canopy gaps in Douglas-fir forests of the Cascade Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 649–658.
- Tan R, Li W, Yang YM, Du F, Wang J (2013) Niche characteristics of dominant species in Napahai wetland plant communities under different disturbance regimes. *Journal of Lake Sciences*, 25, 681–687. (in Chinese with English abstract) [谭芮, 李伟, 杨宇明, 杜凡, 王娟 (2013) 不同干扰条件下纳帕海湿地植物群落优势种群的生态位. *湖泊科学*, 25, 681–687.]
- Tian YZ (1988) Tugayi in the delta of the lower reaches of the Kerya River—a natural complex reflecting ecological degradation. *Journal of Desert Research*, 8(2), 14–28. (in Chinese with English abstract) [田裕钊 (1988) 克里雅河下游三角洲的吐加依——标志生态退化的一种自然综合体. *中国沙漠*, 8(2), 14–28.]
- Tilman D (1999) The ecological consequences of changes in biodiversity: a research for general principles. *Ecology*, 80, 1455–1474.
- Wang DB, Ji SY, Chen FP (2001) A review on the species diversity of plant community. *Chinese Journal of Ecology*, 20(4), 55–60. (in Chinese with English abstract) [汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏 (2001) 植物群落物种多样性研究综述. *生态学杂志*, 20(4), 55–60.]
- Wang HL, Lü GH, Yang XD (2011) Interspecific association of main plants in Ebinur Lake Wetland of Xinjiang, Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 2713–2718. (in

- Chinese with English abstract) [王合玲, 吕光辉, 杨晓东 (2011) 新疆艾比湖湿地主要植物的种间关联分析. 生态学报, 30, 2713–2718.]
- Wang HL, Zhang HG, Lü GH (2013) Quantitative classification and ordination of plant communities in Ebinur Lake Wetland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27, 177–181. (in Chinese with English abstract) [王合玲, 张辉国, 吕光辉 (2013) 艾比湖湿地植物群落的数量分类和排序. 干旱区资源与环境, 27, 177–181.]
- Wang LJ, Zhao CY, Li J, Zhu H, Kou SY (2009) Study on the early-spring species diversity in a Haloxylon desert in the north Fukang region, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 26, 574–581. (in Chinese with English abstract) [王丽娟, 赵成义, 李君, 朱宏, 寇思勇 (2009) 阜康北部梭梭荒漠早春物种多样性研究. 干旱区研究, 26, 574–581.]
- Wang TQ, Lü GH, Cao J, Zhao XY, Liu ZD, Liu W (2015) Point pattern analysis on dominant populations in Ebinur Lake district. *Xinjiang Agricultural Science*, 52, 2305–2313. (in Chinese with English abstract) [王庭权, 吕光辉, 曹靖, 赵晓英, 刘志东, 刘薇 (2015) 艾比湖地区主要植物种群点格局分析. 新疆农业科学, 52, 2305–2313.]
- Wu ZY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Yang F, Wang ZC, Wang YH, An FH, Zhao CW (2013) The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 6202–6208. (in Chinese with English abstract) [杨帆, 王志春, 王云贺, 安丰华, 赵长巍 (2013) 松嫩草原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系. 生态学报, 33, 6202–6208.]
- Yuan Y, Fu DP, Lü GH (2008) Inter-specific relations of the dominant plants of the wetland vegetation in the Ebinur Lake Wetland in Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Wetland Science*, 6, 486–491. (in Chinese with English abstract) [袁月, 傅德平, 吕光辉 (2008) 新疆艾比湖湿地植被优势种种间关系研究. 湿地科学, 6, 486–491.]
- Zhang JT (2011) *Quantitative Ecology*, 2nd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2011) 数量生态学(第二版). 科学出版社, 北京.]
- Zhang W, Wang WL, Hu YK, Yin W, Gong YM, Fang F, Abeutailpu A (2011) Characteristics of plant niche under different restoration measures in Ili desert grassland of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 19, 358–362. (in Chinese with English abstract) [张伟, 王万林, 胡玉昆, 尹伟, 公延明, 房飞, 阿德列提·艾列吾塔力甫 (2011) 新疆伊犁荒漠草原恢复措施下植物群落生态位特征分析. 中国生态农业学报, 19, 358–362.]
- Zhang XN, Lü GH, Yang XD, Gong L, Qin L, He XM, Liu HQ (2013) Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 5714–5722. (in Chinese with English abstract) [张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 贡璐, 秦璐, 何学敏, 刘昊奇 (2013) 基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联结响应. 生态学报, 33, 5714–5722.]
- Zhang YL, Xu QJ, Xi BD, Zhang LY (2011) Major problems and control measures of water ecological environment in Inner Mongolia Xinjiang Plateau. *Journal of Lake Science*, 23, 828–836. (in Chinese with English abstract) [张亚丽, 许秋瑾, 席北斗, 张列宇 (2011) 中国蒙新高原湖区水环境主要问题及控制对策. 湖泊科学, 23, 828–836.]
- Zhao XC, Lai LM, Zhu LH, Wang JJ, Wang YJ, Zhou JH, Jiang LH, Lu HB, Zhao CQ, Zheng YR (2014) Correlation between characteristics of *Reaumuria soongarica* communities and soil factors in the Sangong River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 878–889. (in Chinese with English abstract) [赵学春, 来利明, 朱林海, 王健健, 王永吉, 周继华, 姜联合, 鲁洪斌, 赵春强, 郑元润 (2014) 三工河流域琵琶柴群落特征与土壤因子的相关分析. 生态学报, 34, 878–889.]
- Zhao ZY, Wang RH, Yin CH, Wang L (2007) Influence of spatial heterogeneity of soil salinity on plant community structure and composition of plain at south piedmont of Tianshan Mountains. *Arid Land Geography*, 30, 839–845. (in Chinese with English abstract) [赵振勇, 王让会, 尹传华, 王雷 (2007) 天山南麓山前平原土壤盐分空间异质性对植物群落组成及结构的影响. 干旱区地理, 30, 839–845.]
- Zhou C, He LH, Yang N (2010) Variations in the Ebinur Lake area caused by human activities and climatic changes. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30, 121–126. (in Chinese with English abstract) [周驰, 何隆华, 杨娜 (2010) 人类活动和气候变化对艾比湖湖泊面积的影响. 海洋地质与第四纪地质, 30, 121–126.]
- Zhu ZL, Li DZ, Wang XP, Sheng LJ, Shi Q (2006) Water physiology integration and its ecological effect of clonal plants. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 26, 2602–2614. (in Chinese with English abstract) [朱志玲, 李德志, 王绪平, 盛丽娟, 石强 (2006) 克隆植物的水分生理整合及其生态效应. 西北植物学报, 26, 2602–2614.]

(责任编辑: 张大勇 责任编辑: 黄祥忠)