

艾比湖流域不同水盐环境植物多样性对生态系统多功能性的影响

张洁^{a,b}, 吕光辉^{a,b,①}, 王恒方^{a,b}, 蒋腊梅^{a,b}, 蔡艳^{a,b}
(新疆大学: a. 资源与环境科学学院, b. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 以艾比湖流域荒漠生态系统为研究对象, 基于 Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数, 对植物多样性与生态系统多功能性的关系进行了研究。结果表明: 高水盐环境(土壤含水量 10.93%, 土壤含盐量 5.95 g · kg⁻¹)下, 群落主要由胡杨(*Populus euphratica* Oliv.) 和怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.) 等乔木组成; 中水盐环境(土壤含水量 6.87%, 土壤含盐量 3.96 g · kg⁻¹)下, 群落主要由白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、罗布麻(*Apocynum venetum* Linn.) 和铃铛刺(*Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss) 等灌木组成; 低水盐环境(土壤含水量 2.91%, 土壤含盐量 2.58 g · kg⁻¹)下, 群落主要由沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.) 和小獐毛(*Aeluropus pungens* (M. Bieb.) C. Koch) 等草本组成。高、中和低水盐环境下, Margalef 丰富度指数的差异不显著($P > 0.05$); 功能丰富度指数分别为 10.83、8.73 和 6.87, 三者间差异显著($P < 0.05$); 高和中水盐环境下, 生态系统多功能性指数显著高于低水盐环境。高和中水盐环境下, Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数呈显著相关关系, 拟合系数(R^2) 分别为 0.319 和 0.313; 低水盐环境下, 二者间的相关关系不显著。高水盐环境下, Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与生态系统单一功能间相关关系均不显著; 中和低水盐环境下, Margalef 丰富度指数仅与植物叶片有机碳含量呈显著相关关系, R^2 分别为 0.214 和 0.274。高水盐环境下, 功能丰富度指数与生态系统多功能性指数呈显著相关关系, R^2 为 0.327; 中水盐环境下, Margalef 丰富度指数与生态系统多功能性指数呈显著相关关系, R^2 为 0.152。对于整个样地, 土壤含水量对生态系统多功能性的重要性最高, 功能丰富度指数的重要性高于 Margalef 丰富度指数。综上所述, 随着土壤含水量的降低, Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数间相关关系减弱。非生物因子中土壤含水量对生态系统多功能性影响最大, 进一步说明土壤含水量对生态系统多功能性的限制性作用; 生物因子中功能丰富度指数对生态系统多功能性起主要作用。

关键词: 艾比湖流域; Margalef 丰富度指数; 功能丰富度指数; 生态系统多功能性; 荒漠生态系统

中图分类号: Q948.1; S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)04-0022-09
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.04.03

Effect of plant diversity on ecosystem multifunctionality in different water-salt environments of Ebinur Lake basin ZHANG Jie^{a,b}, LYU Guanghui^{a,b,①}, WANG Hengfang^{a,b}, JIANG Lamei^{a,b}, CAI Yan^{a,b} (Xinjiang University: a. College of Resource and Environment Sciences, b. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(4): 22-30

Abstract: Taking the desert ecosystem in Ebinur Lake basin as research object, the relationship between plant diversity and ecosystem multifunctionality was studied based on Margalef richness index and functional richness index. The results show that in high water-salt environment (soil water content of

收稿日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31560131)

作者简介: 张洁(1995—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事荒漠植物生态学方面的研究。

①通信作者 E-mail: ler@xju.edu.cn

引用格式: 张洁, 吕光辉, 王恒方, 等. 艾比湖流域不同水盐环境植物多样性对生态系统多功能性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(4): 22-30.

10.93% and soil salt content of $5.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), the community is mainly composed of arbors including *Populus euphratica* Oliv. and *Tamarix chinensis* Lour., etc.; in medium water-salt environment (soil water content of 6.87% and soil salt content of $3.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), the community is mainly composed of shrubs including *Nitraria tangutorum* Bobr., *Apocynum venetum* Linn., and *Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss, etc.; in low water-salt environment (soil water content of 2.91% and soil salt content of $2.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), the community is mainly composed of herbs including *Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq. and *Aeluropus pungens* (M. Bieb.) C. Koch, etc. The differences in Margalef richness index are not significant ($P > 0.05$) among high, medium, and low water-salt environments; the functional richness indexes in above three water-salt environments are 10.83, 8.73, and 6.87, respectively, and there are significant ($P < 0.05$) differences among them; the ecosystem multifunctionality indexes in high and medium water-salt environments are significantly higher than that in low water-salt environment. In high and medium water-salt environments, the Margalef richness index is significantly correlated with functional richness index, and the fit coefficients (R^2) are 0.319 and 0.313, respectively; in low water-salt environment, the correlation between them is not significant. In high water-salt environment, the correlations of Margalef richness index and functional richness index with ecosystem single function are not significant; in medium and low water-salt environments, the Margalef richness index only shows significant correlations with organic carbon content in plant leaf, and R^2 are 0.214 and 0.274, respectively. In high water-salt environment, the functional richness index shows a significant correlation with ecosystem multifunctionality index, and R^2 is 0.327; in medium water-salt environment, the Margalef richness index shows a significant correlation with ecosystem multifunctionality index, and R^2 is 0.152. The importance of soil water content to ecosystem multifunctionality is the highest, and that of functional richness index is higher than that of Margalef richness index in the whole sample plot. Taken together, with the decreasing of soil water content, the correlation between Margalef richness index and functional richness index decreases. Among abiotic factors, soil water content has the greatest influence on ecosystem multifunctionality, which further indicates that soil water content has a restrictive effect on ecosystem multifunctionality; among biotic factors, functional richness index has the dominant effect on ecosystem multifunctionality.

Key words: Ebinur Lake basin; Margalef richness index; functional richness index; ecosystem multifunctionality; desert ecosystem

生物多样性对于维持生态系统的进程和功能至关重要^[1]。近年来,生物多样性的下降速度越来越快,频繁、强烈的极端气候事件可能对生态系统产生严重影响^[2-4]。研究生物多样性的丧失对生态系统功能的影响已经成为保护生物学的一个重要研究内容^[5]。生物多样性的丧失会降低生态系统功能,减少提供人类的生态系统服务^[6-7]。Margalef 丰富度指数通常作为衡量生物多样性的主要指标^[1,8-9]。功能丰富度指数能预测生态系统多功能性的变化^[10-11],提高功能丰富度指数会增加生态系统多功能性^[11-12]。

目前,环境因子对生态系统多功能性的影响尚未有定论。在全球荒漠生态系统中,年均降水量对生态系统多功能性有显著影响^[13]。张文馨等^[14]研究认为,土壤盐分是影响黄河三角洲植物多样性和生态系统多功能性的主要环境因子,土壤含盐量的升高直接引起植物多样性的降低,从而间接导致生态系统多功

能性的下降。但蔡艳^[15]的研究结果表明:在荒漠生态系统中,生态系统多功能性随着土壤含盐量的升高而增大。因此,需要拓展生态系统功能在不同的生态系统类型、植被条件和时间空间尺度下的研究,以系统、全面地获得物种多样性与生态系统多功能性间的关系。

本研究以艾比湖流域植物群落为研究对象,选取 Margalef 丰富度指数、功能丰富度指数以及植物叶片和土壤中元素含量作为生态系统单一功能评估生态系统多功能性,探讨不同水盐环境下植物多样性对生态系统多功能性的影响以及 Margalef 丰富度指数、功能丰富度指数和生态系统多功能性的变化规律,明确 Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与生态系统多功能性的关系,研究生物因子(Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数)和非生物因子(土壤含水量、土壤含盐量和土壤 pH 值)对生态系统多功能性的影响,以期明晰艾比湖流域植物多样性与生态系统多功

能性间的关系,了解植物多样性在不同水盐环境下的变化规律及其对生态系统多功能性的影响,为当地植物保护、生境资源合理利用及提高生态系统多功能性提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地国家级自然保护区(东经 82°36′~83°50′、北纬 44°30′~45°09′)位于新疆北部准噶尔盆地西南缘。该区域气候干燥,年均降水量 105.17 mm,年均蒸发量 1 315 mm,年均气温 5℃。该区域典型土壤为灰漠土、灰棕漠土和风沙土,隐域性土壤为盐(盐渍化)土、草甸土和沼泽土^[16]。已有研究结果^[17]表明:垂直阿其克苏河方向上不同距离处土壤水分和盐分具有差异,植物种类也随着离河距离不同而变化。

艾比湖流域特殊的生态环境孕育了特殊的植物资源,该区域主要植物有胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)和沙蓬[*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.]等^[17]。

1.2 方法

1.2.1 样地设置 在艾比湖湿地国家级自然保护区的荒漠区内,垂直于阿其克苏河,在东大桥管护站以北设置样地,其东西相距 480 m,南北相距 600 m,然后设置 80 个面积 30 m×30 m 的样方(由于 13、19、31 和 72 号样方土壤数据不慎丢失,本研究只对其他 76 个样方进行调查),样方间隔 30 m。

1.2.2 样方调查及取样 记录面积 30 m×30 m 样方中所有乔木的多度,然后在各样方的 1 条对角线上随机取 3 个面积 5 m×5 m 的灌木样方调查灌木的多度,再在各灌木样方的 1 条对角线上随机取 4 个面积 1 m×1 m 的草本样方调查草本的多度。同时选择乔木样方内各种类的健康植株 3 株,每株选择 3~5 枚形态、大小和健康状况基本一致的叶片,将同一种类 3 株植株的叶片样品混合均匀后,称取约 100 g 鲜样,先经烘箱 105℃ 杀青 1 h,然后于 70℃ 烘干至恒质量,粉碎,过 60 目筛,干燥保存,用于测定其元素含量。

在面积 30 m×30 m 样方的裸地处,在 1 条对角线上选取 3 个土壤采样点,按照 0~10、10~20 和 20~30

cm 的土壤剖面,先用铝盒收集土样,分别测定各土层的土壤含水量,结果取平均值;然后将每个采样点相同土层的土样混合均匀,取约 300 g 土样,自然风干后用于测定土壤相关指标,结果取平均值。

1.2.3 叶片和土壤元素含量测定 分别测定植物叶片的全氮含量^{[18]264-267}、磷含量^{[18]270}和有机碳含量^{[18]34-35}以及土壤的含水量^{[18]22-24}、含盐量^{[18]187-188}、全氮含量^{[18]44-49}、铵态氮含量^{[18]53}、全磷含量^{[18]74}和速效磷含量^{[18]81-83},采用雷磁 PHS-25 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定土壤 pH 值。

1.3 数据统计分析

利用 R3.4.1 软件的“vegan”和“FD”包计算 Margalef 丰富度指数(C)和功能丰富度指数(FRic)^[19]。利用 SPSS 25.0 统计分析软件中 K 均值聚类分析,根据土壤含水量和土壤含盐量划分水盐环境;参照文献^[15],运用因子分析法计算生态系统多功能性指数;采用 one-way ANOVA 法对 Margalef 丰富度指数、功能丰富度指数和生态系统多功能性指数进行方差分析;利用线性回归模型分析 Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与生态系统单一功能和生态系统多功能性指数的关系。利用 R3.4.1 软件的“randomForest”包对影响生态系统多功能性的生物和非生物因子进行重要性分析。

2 结果和分析

2.1 艾比湖流域不同水盐环境的划分和物种组成及其土壤、植物属性特征

2.1.1 不同水盐环境的划分和物种组成 艾比湖流域不同水盐环境土壤的含水量和含盐量及物种组成见表 1。由表 1 可以看出:高、中和低水盐环境的土壤含水量分别为 10.93%、6.87% 和 2.91%,土壤含盐量分别为 5.95、3.96 和 2.58 g·kg⁻¹,且在不同水盐环境间差异显著($P<0.05$)。

由表 1 还可以看出:高、中和低水盐环境共分布植物 24 种,其中,高水盐环境下,群落主要由胡杨和怪柳等乔木组成;中水盐环境下,群落主要由白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、罗布麻(*Apocynum venetum* Linn.)和铃铛刺[*Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss]等灌木组成;低水盐环境下,群落主要由沙蓬和小獐毛[*Aeluropus pungens* (M. Bieb.) C. Koch]等草本组成。

表 1 艾比湖流域不同水盐环境土壤的含水量和含盐量及物种组成 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 1 Contents of water and salt in soil and species composition in different water-salt environments of Ebinur Lake basin ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

水盐环境 Water-salt environment	样方数 Number of quadrats	土壤含水量/% Soil water content	土壤 含盐量/(g·kg ⁻¹) Soil salt content	种类 ²⁾ Species ²⁾
高 High	18	10.93±0.49a	5.95±0.27a	Ha, Pe, Nt, Rs, Sc, Ss, Av, Pa, Kf, Karc, Tc, Kalc, Hs, Sm, Cg, Gu
中 Medium	37	6.87±0.19b	3.96±0.07b	Ha, Pe, Nt, Rs, Sc, Ss, Av, Pa, Kf, Karc, Tc, Kalc, Hs, Sm, Alhs, Lt, Hh, Hg
低 Low	21	2.91±0.29c	2.58±0.12c	Ha, Pe, Nt, Rs, Sc, Ss, Av, Pa, Kf, Karc, Tc, Kalc, Hs, Alhs, Lt, Hh, Ap, Agrs, Cm, Sk

¹⁾ 同列中不同小写字母表示不同水盐环境间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference among different water-salt environments.

²⁾ Ha: 梭梭 *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge; Pe: 胡杨 *Populus euphratica* Oliv.; Nt: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobr.; Rs: 琵琶柴 *Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim.; Sc: 猪毛菜 *Salsola collina* Pall.; Ss: 盐地碱蓬 *Suaeda salsa* (Linn.) Pall.; Av: 罗布麻 *Apocynum venetum* Linn.; Pa: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; Kf: 盐爪爪 *Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.; Karc: 花花柴 *Karelinia caspia* (Pall.) Less.; Tc: 柽柳 *Tamarix chinensis* Lour.; Kalc: 里海盐爪爪 *Kalidium capsicum* (Linn.) Ung.-Sternb.; Hs: 盐节木 *Halocnemum strobilaceum* (Pall.) Bieb.; Sm: 小叶碱蓬 *Suaeda microphylla* (C. A. Mey.) Pall.; Cg: 灰绿藜 *Chenopodium glaucum* Linn.; Gu: 甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch.; Alhs: 骆驼刺 *Alhagi sparsifolia* Shap.; Lt: 乳苣 *Lactuca tatarica* (Linn.) C. A. Mey.; Hh: 铃铛刺 *Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss; Hg: 盐生草 *Halogeton glomeratus* (Bieb.) C. A. Mey.; Ap: 小獐毛 *Aeluropus pungens* (M. Bieb.) C. Koch; Agrs: 沙蓬 *Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.; Cm: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; Sk: 新疆绢蒿 *Seriphidium kaschgaricum* (Krasch.) Poljak.

2.1.2 植物叶片和土壤元素含量的比较 艾比湖流域不同水盐环境下植物叶片和土壤元素含量见表 2。由表 2 可以看出:高、中和低水盐环境间植物叶片全氮和磷含量差异不显著 ($P>0.05$)。低水盐环境下植

物叶片有机碳含量显著高于高和中水盐环境。低水盐环境的土壤全氮、全磷和速效磷含量显著低于高和中水盐环境,3 种水盐环境间土壤铵态氮含量差异不显著。

表 2 艾比湖流域不同水盐环境下植物叶片和土壤元素含量的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 2 Comparison on element contents in plant leaf and soil in different water-salt environments of Ebinur Lake basin ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

水盐环境 Water-salt environment	植物叶片各元素含量/(g·kg ⁻¹) Each element content in plant leaf			土壤各元素含量/(g·kg ⁻¹) Each element content in soil			
	全氮 Total nitrogen	磷 Phosphorus	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus
高 High	0.17±0.01a	0.96±0.00a	2.59±0.10b	0.26±0.02a	6.68±0.44a	0.49±0.01a	0.21±0.00a
中 Medium	0.19±0.01a	1.00±0.03a	2.63±0.41b	0.21±0.01a	6.58±0.53a	0.48±0.01a	0.19±0.01a
低 Low	0.16±0.01a	1.03±0.01a	2.97±0.53a	0.15±0.01b	6.24±0.53a	0.41±0.02b	0.13±0.01b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示不同水盐环境间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference among different water-salt environments.

2.2 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性和生态系统多功能性的特征及差异

艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性和生态系统多功能性见表 3, Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数的回归分析结果见表 4。

由表 3 可以看出:高、中和低水盐环境下, Margalef 丰富度指数的差异不显著 ($P>0.05$); 功能丰富度指数分别为 10.83、8.73 和 6.87, 在 3 种水盐环境间差异显著 ($P<0.05$); 生态系统多功能性指数分别为 0.10、0.03 和 -0.36, 高和中水盐环境下生态系统多功能性指数显著高于低水盐环境。

由表 4 可以看出:高和中水盐环境下, Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数呈显著相关关系, 拟合系数 (R^2) 分别为 0.319 和 0.313。低水盐环境下,

Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数的相关关系不显著。

表 3 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性和生态系统多功能性的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Comparison on plant diversity and ecosystem multifunctionality in different water-salt environments of Ebinur Lake basin ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

水盐环境 Water-salt environment	Margalef 丰富度 指数 Margalef richness index	功能丰富度 指数 Functional richness index	生态系统 多功能性指数 Ecosystem multifunctionality index
高 High	1.19±0.06a	10.83±0.66a	0.10±0.05a
中 Medium	1.32±0.05a	8.73±0.44b	0.03±0.04a
低 Low	1.39±0.07a	6.87±0.49c	-0.36±0.06b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示不同水盐环境间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference among different water-salt environments.

表4 艾比湖流域不同水盐环境下 Margalef 丰富度指数 (C) 与功能丰富度指数 (FRic) 的回归分析结果

Table 4 Result of regression analysis on Margalef richness index (C) and functional richness index (FRic) in different water-salt environments of Ebinur Lake basin

水盐环境 Water-salt environment	回归方程 Regression equation	拟合系数 Fit coefficient (R^2)	P 值 P value
高 High	FRic=5.707C+4.009	0.319	0.015
中 Medium	FRic=4.763C+2.448	0.313	0.000
低 Low	FRic=1.731C+4.464	0.219	0.219

2.3 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性与生态系统单一功能和生态系统多功能性的关系

2.3.1 植物多样性与生态系统单一功能的关系 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性与生态系统单一功能的回归分析结果见表5。由表5可以看出:高水盐环境下, Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与生态系统单一功能(包括植物叶片全氮、磷和有机碳含量以及土壤全氮、铵态氮、全磷和速效磷含量)

表5 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性与生态系统单一功能的回归分析结果¹⁾

Table 5 Result of regression analysis on plant diversity and ecosystem single function in different water-salt environments of Ebinur Lake basin¹⁾

水盐环境 Water-salt environment	Margalef 丰富度指数与生态系统单一功能的回归分析 Regression analysis on Margalef richness index and ecosystem single function			功能丰富度指数与生态系统单一功能的回归分析 Regression analysis on functional richness index and ecosystem single function		
	回归方程 Regression equation	拟合系数 Fit coefficient (R^2)	P 值 P value	回归方程 Regression equation	拟合系数 Fit coefficient (R^2)	P 值 P value
高 High	$C = 0.577C_{LN} + 0.637$	0.021	0.562	$FRic = -5.098C_{LN} + 5.904$	0.016	0.612
	$C = -5.623C_{LP} + 2.204$	0.168	0.091	$FRic = -37.284C_{LP} + 17.521$	0.073	0.280
	$C = -0.001C_{LOC} + 1.400$	0.017	0.606	$FRic = -0.012C_{LOC} + 13.893$	0.037	0.444
	$C = 0.955C_{STN} + 0.954$	0.060	0.326	$FRic = 10.190C_{STN} + 8.260$	0.067	0.299
	$C = 0.029C_{SAN} + 0.997$	0.039	0.433	$FRic = 0.385C_{SAN} + 8.251$	0.065	0.307
	$C = 1.438C_{STP} + 0.490$	0.069	0.292	$FRic = 8.938C_{STP} + 6.447$	0.026	0.521
	$C = 0.006C_{SAP} + 1.073$	0.018	0.593	$FRic = 0.071C_{SAP} + 9.290$	0.029	0.501
中 Medium	$C = -0.073C_{LN} + 1.393$	0.002	0.798	$FRic = -4.090C_{LN} + 12.836$	0.081	0.087
	$C = -0.994C_{LP} + 1.506$	0.059	0.146	$FRic = -6.810C_{LP} + 10.008$	0.038	0.245
	$C = 0.003C_{LOC} + 0.414$	0.214	0.004	$FRic = 0.007C_{LOC} + 6.986$	0.011	0.537
	$C = -1.310C_{STN} + 1.600$	0.059	0.146	$FRic = 0.836C_{STN} + 8.550$	0.000	0.915
	$C = -0.002C_{SAN} + 1.334$	0.001	0.885	$FRic = 0.064C_{SAN} + 8.308$	0.006	0.645
	$C = -2.367C_{STP} + 2.457$	0.081	0.088	$FRic = 8.863C_{STP} + 4.468$	0.016	0.461
	$C = -0.015C_{SAP} + 1.596$	0.084	0.082	$FRic = 0.068C_{SAP} + 7.449$	0.025	0.354
低 Low	$C = -1.291C_{LN} + 2.718$	0.019	0.551	$FRic = -4.059C_{LN} + 11.041$	0.005	0.762
	$C = 2.328C_{LP} + 1.701$	0.090	0.187	$FRic = -7.244C_{LP} + 8.040$	0.023	0.514
	$C = 0.004C_{LOC} + 0.329$	0.274	0.015	$FRic = -0.003C_{LOC} + 7.857$	0.006	0.736
	$C = 3.944C_{STN} + 0.800$	0.126	0.115	$FRic = 18.975C_{STN} + 4.022$	0.076	0.226
	$C = -0.028C_{SAN} + 1.569$	0.037	0.405	$FRic = 0.039C_{SAN} + 6.631$	0.002	0.855
	$C = -1.216C_{STP} + 1.892$	0.075	0.229	$FRic = -1.365C_{STP} + 7.434$	0.002	0.830
	$C = 0.001C_{SAP} + 1.376$	0.000	0.957	$FRic = 0.099C_{SAP} + 5.553$	0.028	0.466

¹⁾ C: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; FRic: 功能丰富度指数 Functional richness index; C_{LN} : 叶片全氮含量 Leaf total nitrogen content; C_{LP} : 叶片磷含量 Leaf phosphorus content; C_{LOC} : 叶片有机碳含量 Leaf organic carbon content; C_{STN} : 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; C_{SAN} : 土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content; C_{STP} : 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; C_{SAP} : 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content.

间相关关系不显著 ($P > 0.05$)。中和低水盐环境下, Margalef 丰富度指数仅与植物叶片有机碳含量呈显著 ($P < 0.05$) 相关关系, 拟合系数 (R^2) 分别为 0.214 和 0.274, 与上述植物叶片其他元素含量以及土壤各元素含量间相关关系不显著。中和低水盐环境下, 功能丰富度指数与生态系统单一功能间相关关系不

显著。

2.3.2 植物多样性与生态系统多功能性的关系 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性与生态系统多功能性的回归分析结果见表6。由表6可以看出:高水盐环境下, 功能丰富度指数与生态系统多功能性指数呈显著相关关系, R^2 为 0.327, 说明解释了 32.7% 的

生态系统多功能性变化;Margalef 丰富度指数与生态系统多功能性指数的相关关系不显著。中水盐环境下,Margalef 丰富度指数与生态系统多功能性指数呈显著相关关系, R^2 为 0.152,说明解释了15.2%的生态系统多功能性变化;功能丰富度指数与生态系统多功能性指数的相关关系不显著。低水盐环境下,Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与生态系统多功能性指数的相关关系均不显著。

表6 艾比湖流域不同水盐环境下植物多样性与生态系统多功能性的回归分析结果¹⁾

Table 6 Result of regression analysis on plant diversity and ecosystem multifunctionality in different water-salt environments of Ebinur Lake basin¹⁾

水盐环境 Water-salt environment	回归方程 Regression equation	拟合系数 Fit coefficient (R^2)	P 值 P value
高 High	MFa=0.302C-0.153	0.053	0.663
	MFa=0.017FRic ² -0.334FRic+1.695	0.327	0.049
中 Medium	MFa=-0.507C+0.772	0.152	0.017
	MFa=-0.017FRic+0.247	0.012	0.523
低 Low	MFa=0.513C ² -1.586C+0.788	0.061	0.567
	MFa=-0.010FRic ² +0.184FRic-1.079	0.065	0.546

¹⁾ MFa: 生态系统多功能性指数 Ecosystem multifunctionality index; C: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; FRic: 功能丰富度指数 Functional richness index.

表7 艾比湖流域不同水盐环境和整个样地生物和非生物因子的重要性

Table 7 Importance of biotic and abiotic factors in different water-salt environments and the whole sample plot of Ebinur Lake basin

排序 Sorting	高水盐环境 High water-salt environment		中水盐环境 Medium water-salt environment		低水盐环境 Low water-salt environment		整个样地 The whole sample plot	
	因子 ¹⁾ Factor ¹⁾	节点纯度增加值 IncNodePurity						
1	pH	0.477	C _{sw}	1.366	C _{sw}	0.393	C _{sw}	2.936
2	FRic	0.374	pH	1.082	C _{ss}	0.316	C _{ss}	2.747
3	C _{sw}	0.330	C	1.079	C	0.264	pH	2.694
4	C _{ss}	0.309	C _{ss}	0.776	pH	0.226	FRic	1.902
5	C	0.306	FRic	0.764	FRic	0.153	C	1.777

¹⁾ C: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; FRic: 功能丰富度指数 Functional richness index; C_{sw}: 土壤含水量 Soil water content; C_{ss}: 土壤含盐量 Soil salt content; pH: 土壤 pH 值 Soil pH value.

高到低依次为土壤含水量、土壤含盐量和土壤 pH 值;生物因子中功能丰富度指数对生态系统多功能性的重要性高于 Margalef 丰富度指数。

3 讨 论

3.1 不同水盐环境下植物多样性和生态系统多功能性的特征

土壤水盐含量变化对艾比湖流域植物多样性有

2.4 艾比湖流域生物和非生物因子对生态系统多功能性的影响

艾比湖流域不同水盐环境和整个样地生物和非生物因子的重要性分析结果见表7。由表7可以看出:高水盐环境下,生物因子中功能丰富度指数对生态系统多功能性的重要性较高,Margalef 丰富度指数在选择的所有变量中重要性最低;对于非生物因子,重要性由高到低依次为土壤 pH 值、土壤含水量和土壤含盐量。中水盐环境下,生物因子中 Margalef 丰富度指数对生态系统多功能性的重要性较高,功能丰富度指数在选择的所有变量中重要性最低;对于非生物因子,重要性由高到低依次为土壤含水量、土壤 pH 值和土壤含盐量。低水盐环境下,生物因子中 Margalef 丰富度指数对生态系统多功能性的重要性较高,功能丰富度指数在选择的所有变量中重要性最低;对于非生物因子,重要性由高到低依次为土壤含水量、土壤含盐量和土壤 pH 值。

整个样地下,随着回归决策树数量增加,模型误差逐渐降低,当回归决策树数量增至 40 后,误差趋于稳定。选取这个数量构建整个样地的随机森林模型,结果表明:在所有变量中,对于非生物因子,重要性由

不同程度的影响,水盐条件变化对植物多样性的影响会间接改变荒漠生态系统的多功能性,因此,土壤水盐含量是影响植物群落分布的决定性环境因子^[10,20]。本研究中,高水盐环境下,群落主要由胡杨和柽柳等乔木组成;中水盐环境下,群落主要由白刺、罗布麻和铃铛刺等灌木组成;低水盐环境下,群落主要由沙蓬和小獐毛等草本组成,距离河岸远近呈现出不同的群落特征,说明乔木、灌木和草本在应对不同生境条件时的生存策略不同。本研究中,Margalef 丰

富度指数表现为在高水盐环境下最低,这可能是靠近河岸,受艾比湖流域枯水期和丰水期的干扰影响,植物对干扰会做出激烈的响应^[21],因此,靠近河岸的植物因不能忍受较长时间水分匮乏而死亡,导致 Margalef 丰富度指数降低^[15]。功能丰富度指数在低水盐环境下最低,这可能是由于环境胁迫导致的物种变化引起某些植物功能性状的信息丢失,使得功能丰富度指数降低^[17,22]。本研究发现,生态系统多功能性指数在高水盐环境下最高,在低水盐环境下最低,且高和中水盐环境下的生态系统多功能性指数均与低水盐环境存在显著($P < 0.05$)差异,可能的原因是在高和中水盐环境下生态系统多功能性指数不受土壤水盐含量的限制,但当土壤含水量继续下降(低于6.87%),植物生长开始受限,大多数植物受到水分胁迫,进而影响生态系统多功能性^[23]。高水盐环境下,功能丰富度指数和生态系统多功能性指数均最高,这可能由于高功能丰富度指数导致环境资源利用效率的增加促进了生态系统生产力的增加,且增强群落对疾病、害虫和干扰的防御能力^[23-24]。

多数研究认为,植物功能差异性随着物种多样性的增加而增加,即物种多样性和功能多样性存在高度的正相关关系^[25-26]。本研究结果表明:高和中水盐环境下, Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数呈显著的正相关关系,可能因为高和中水盐环境下的物种多样性为植物功能性状的变化提供了更多可能^[17],所以物种越多、功能多样性越高;而低水盐环境下,干旱胁迫加剧,少数物种占据优势,因而功能性状的分布离散度较高,故 Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数无显著($P > 0.05$)的相关关系^[27],这也说明低水盐环境下物种的生态位分化程度较低,资源利用率较低。因此,可初步推测, Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数间的相关关系可能随着土壤含水量和含盐量的降低而减弱。

3.2 不同水盐环境下植物多样性对生态系统功能的影响

前人的研究结果表明:在局部尺度上,生物多样性通常能够增加单个生态系统功能,但随着生物多样性的增加,这种生态系统功能往往达到饱和状态,有些物种对生态系统功能的影响没有被体现,存在冗余现象^[28]。本研究中,高水盐环境下, Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与任何生态系统单一功能的相关关系均不显著($P > 0.05$),可能是该环境胁迫较

轻,生态系统各功能表现较好。中和低水盐环境下, Margalef 丰富度指数仅与植物叶片有机碳含量呈显著($P < 0.05$)相关关系,可能的原因是中和低水盐环境植物在干旱胁迫下光合作用受阻^[29],从而导致群落整体的糖类合成减少, Margalef 丰富度指数可能处于碳限制状态。此外,艾比湖流域的植物生物量低且受人为干扰较少,动物粪便和肥料等有机质来源较少,导致限制作用更明显^[30]。只研究植物多样性与生态系统单一功能会低估植物多样性对生态系统多功能性的影响^[31],因此有必要讨论植物多样性对生态系统多功能性的影响。本研究中,高水盐环境下,功能丰富度指数解释了32.7%的生态系统多功能性变化;中水盐环境下, Margalef 丰富度指数解释了15.2%的生态系统多功能性变化。功能丰富度指数对生态系统多功能性的重要性高于 Margalef 丰富度指数,说明该研究区功能丰富度指数与生态系统多功能性的关系更为密切^[32]。

3.3 不同水盐环境下生物和非生物因子对生态系统多功能性的影响

水分是制约植物生长的主要限制因子,也是荒漠生态系统恢复的最大制约因子^[33-34]。多数研究结果表明:水分通过不同方式和程度显著影响生态系统功能的变化^[35-36]。土壤 pH 值可通过影响植物多样性和微生物多样性间接影响生态系统多功能性^[13]。本研究中,高水盐环境下,生物因子中功能丰富度指数对生态系统多功能性的重要性高于 Margalef 丰富度指数,非生物因子中土壤 pH 值对生态系统多功能性的重要性最高,说明高土壤 pH 值抑制土壤有机碳的分解^[37],有利于土壤有机碳的积累,为植物多样性提供了条件,从而对生态系统多功能性产生影响^[38]。中和低水盐环境下,非生物因子中均为土壤含水量对生态系统多功能性的重要性最高, Margalef 丰富度指数对生态系统多功能性的影响弱于土壤含水量,这表明土壤含水量通过影响植物多样性降低生态系统多功能性。对于整个样地来说,功能丰富度指数对生态系统多功能性的重要性高于 Margalef 丰富度指数,重要性最高的是土壤含水量,说明在该研究区功能丰富度指数对生态系统多功能性的影响较 Margalef 丰富度指数更大^[11,39]。土壤含水量通过影响群落中消费者、分解者及微生物间的相互作用直接影响生态系统功能,进一步说明水分是影响荒漠生态系统多功能性的主要因子^[9]。

4 结 论

综合不同水盐环境下植物多样性与生态系统多功能性关系的研究结果,得出以下结论:

1)不同水盐环境下,Margalef 丰富度指数表现为低水盐环境下最高,中水盐环境下次之,高水盐环境下最低;功能丰富度指数和生态系统多功能性指数均在高水盐环境下最高,中水盐环境下次之,低水盐环境下最低。Margalef 丰富度指数与功能丰富度指数间相关关系随着土壤含水量和含盐量的降低而降低,即随着干旱胁迫的加剧,二者间相关关系减弱。

2)中和低水盐环境下,Margalef 丰富度指数仅与植物叶片有机碳含量呈显著($P<0.05$)相关关系。高水盐环境下,功能丰富度指数解释了 32.7%的生态系统多功能性变化;中水盐环境下,Margalef 丰富度指数解释了 15.2%的生态系统多功能性变化。低水盐环境下,Margalef 丰富度指数和功能丰富度指数与生态系统多功能性指数均没有呈现显著相关关系,说明植物多样性与生态系统多功能性的相关关系随土壤含水量和含盐量的降低而减弱。功能丰富度指数对生态系统多功能性指数的解释量高于 Margalef 丰富度指数,说明该研究区功能丰富度指数与生态系统多功能性的关系更为密切。

3)高水盐环境下,生物因子中功能丰富度指数对生态系统多功能性的重要性高于 Margalef 丰富度指数,非生物因子中土壤 pH 值对生态系统多功能性的重要性最高。中和低水盐环境下,非生物因子中均为土壤含水量对生态系统多功能性的重要性最高,Margalef 丰富度指数对生态系统多功能性的影响弱于土壤含水量。对于整个样地环境来说,重要性最高的是土壤含水量,生物因子中功能丰富度指数的重要性高于 Margalef 丰富度指数,说明生物因子中对生态系统多功能性起主要作用的是功能丰富度指数。

参考文献:

- [1] HECTOR A, BAGCHI R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [2] PEDERSON N, DYER J M, MCEWAN R W, et al. The legacy of episodic climatic events in shaping temperate, broadleaf forests[J]. *Ecological Monographs*, 2014, 84(4): 599-620.
- [3] DOUGHTY C E, METCALFE D B, GIRARDIN C A J, et al. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia [J]. *Nature*, 2015, 519(7541): 78-82.
- [4] PEREIRA H M, LEADLEY P W, PROENÇA V, et al. Scenarios for global biodiversity in the 21st century[J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1496-1501.
- [5] FANIN N, GUNDALE M J, FARRELL M, et al. Consistent effects of biodiversity loss on multifunctionality across contrasting ecosystems [J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2018, 2(2): 269-278.
- [6] CARDINALE B J, MATULICH K L, HOOPER D U, et al. The functional role of producer diversity in ecosystems [J]. *American Journal of Botany*, 2011, 98(3): 572-592.
- [7] GAMFELDT L, SNÄLL T, BAGCHI R, et al. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1340.
- [8] VAN DER PLAS F, MANNING P, ALLAN E, et al. Jack-of-all-trades effects drive biodiversity-ecosystem multifunctionality relationships in European forests [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 11109.
- [9] MAESTRE F T, QUERO J L, GOTELLI N J, et al. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands [J]. *Science*, 2012, 335(6065): 214-218.
- [10] STEUDEL B, HALLMANN C, LORENZ M, et al. Contrasting biodiversity-ecosystem functioning relationships in phylogenetic and functional diversity [J]. *New Phytologist*, 2016, 212(2): 409-420.
- [11] SCHNEIDER F D, MORSDORF F, SCHMID B, et al. Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1441.
- [12] MOUILLOT D, VILLÉGER S, SCHERER-LORENZEN M, et al. Functional structure of biological communities predicts ecosystem multifunctionality [J]. *PLOS ONE*, 2011, 6(3): e17476.
- [13] DELGADO-BAQUERIZO M, MAESTRE F T, REICH P B, et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10541.
- [14] 张文馨, 范小莉, 王强, 等. 黄河三角洲植物多样性与生态系统多功能性间的关系 [J]. *山东大学学报(理学版)*, 2020, 55(1): 110-116.
- [15] 蔡艳. 水盐梯度下荒漠植物多样性与生态系统多功能性的关系 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学资源与环境科学学院, 2019: 34.
- [16] 赵晓英, 何学敏, 杨晓东, 等. 艾比湖流域水盐变化对荒漠植物多样性的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6): 76-82.
- [17] 张雪妮, 杨晓东, 吕光辉. 水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境的关系 [J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3206-3215.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 刘晓红, 李校, 彭志杰. 生物多样性计算方法的探讨 [J]. 河

- 北林果研究, 2008, 23(2): 166-168.
- [20] 秦建蓉, 马红彬, 沈 艳, 等. 宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2015, 35(9): 1891-1898.
- [21] 王继丰, 韩大勇, 王建波, 等. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3515-3524.
- [22] 孔彬彬, 卫欣华, 杜家丽, 等. 刈割和施肥对高寒草甸物种多样性和功能多样性时间动态及其关系的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(3): 187-199.
- [23] ZUO X, ZHANG J, LV P, et al. Effects of plant functional diversity induced by grazing and soil properties on above- and belowground biomass in a semiarid grassland [J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 555-561.
- [24] CADOTTE M W, CARSCADDEN K, MIROTCHEV N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(5): 1079-1087.
- [25] JIANG X L, ZHANG W G, WANG G. Biodiversity effects on biomass production and invasion resistance in annual versus perennial plant communities [J]. Biodiversity and Conservation, 2007, 16(6): 1983-1994.
- [26] 郑丽婷, 苏 田, 刘翔宇, 等. 庙岛群岛典型植物群落物种、功能、结构多样性及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 343-351.
- [27] 董世魁, 汤 琳, 张相锋, 等. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1472-1483.
- [28] GAMFELDT L, HILLEBRAND H, JONSSON P R. Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning[J]. Ecology, 2008, 89(5): 1223-1231.
- [29] 王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等. 干旱胁迫下胡杨光合光响应过程模拟与模型比较[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2315-2324.
- [30] 张 磊, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 影响艾比湖流域荒漠植物生物量分布的土壤驱动力分析[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(3): 12-18.
- [31] LEFCHECK J S, BYRNES J E K, ISBELL F, et al. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6936.
- [32] HUANG X, SU J, LI S, et al. Functional diversity drives ecosystem multifunctionality in a *Pinus yunnanensis* natural secondary forest[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 6979.
- [33] PORPORATO A, DALY E, RODRIGUEZ-ITURBE I. Soil water balance and ecosystem response to climate change [J]. The American Naturalist, 2004, 164(5): 625-632.
- [34] WEI W, FENG X, YANG L, et al. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 1323-1332.
- [35] VALENCIA E, MAESTRE F T, LE BAGOUSSE-PINGUET Y, et al. Functional diversity enhances the resistance of ecosystem multifunctionality to aridity in Mediterranean drylands [J]. New Phytologist, 2015, 206(2): 660-671.
- [36] LUCAS-BORJA M E, DELGADO-BAQUERIZO M. Plant diversity and soil stoichiometry regulates the changes in multifunctionality during pine temperate forest secondary succession[J]. Science of the Total Environment, 2019, 697: 134204.
- [37] JING X, SANDERS N J, SHI Y, et al. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 8159.
- [38] 徐治国, 何 岩, 闫百兴, 等. 植物 N/P 与土壤 pH 值对湿地植物物种丰富度的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 346-349.
- [39] FINNEY D M, KAYE J P. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system [J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(2): 509-517.

(责任编辑: 张明霞)