

# 巴音布鲁克高寒草甸植物功能多样性与生态系统多功能性关系沿海拔梯度的变化

吕自立<sup>1</sup> 刘彬<sup>1\*</sup> 常凤<sup>1\*\*</sup> 马紫荆<sup>1</sup> 曹秋梅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 新疆特殊环境物种多样性应用与调控重点实验室, 新疆师范大学生命科学学院, 乌鲁木齐 830054; <sup>2</sup>中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830054

**摘要** 明确植物功能多样性与生态系统多功能性(EMF)之间的关系, 可以更清晰地阐释生态系统功能的变化。以往生物多样性-生态系统功能关系的研究仅停留在对单一生态系统功能(SEF)的实验性或观察性调查, 忽略了生态系统能同时提供多种功能和服务这一最本质的重要价值。该研究以巴音布鲁克高寒草甸为研究区, 在海拔2 194–3 062 m范围内以200 m左右为间隔设置了5个海拔高度, 选取土壤全氮含量、硝态氮含量、铵态氮含量、全磷含量、速效磷含量、全钾含量、速效钾含量、土壤密度、植物群落地上与地下生物量10个与养分循环、土壤有机碳蓄积和植物生长有密切联系的指标, 综合各指标平均值来表征EMF。结果表明: (1)群落物种组成沿海拔梯度变化较大, 海拔2 600 m处物种丰富度显著高于其他海拔; 功能均匀度指数(FEve)、功能丰富度指数(FRic)和功能分散度指数(FDis)均随着海拔的升高呈现“单峰”变化趋势, 最高值分别出现在2 600、2 800、2 800 m处; Rao二次熵指数(Rao'Q)整体呈现单调递减趋势。(2)各海拔高度上FRic、FDis与EMF间均存在极显著的正相关关系, 分别解释了EMF 47%和43%的变化; 在海拔2 600 m处FEve与土壤养分循环指数、土壤有机碳蓄积指数间存在显著相关关系; 海拔3 000 m处Rao'Q与土壤养分循环指数、有机碳蓄积指数和EMF间均存在显著相关关系。(3)通过构建结构方程模型分析海拔梯度上植物功能多样性与EMF的关系可知, 海拔以功能多样性为媒介作用于EMF, 其中功能丰富度对EMF的影响最大, 验证了功能多样性与EMF间存在互补效应。综上, 随着海拔的变化, 功能多样性会做出相应的变化, 进而影响SEF和EMF, 功能多样性对于维持EMF具有重要的意义。

**关键词** 功能多样性; 生态系统多功能性; 单一生态系统功能; 海拔; 高寒草甸

吕自立, 刘彬, 常凤, 马紫荆, 曹秋梅 (2023). 巴音布鲁克高寒草甸植物功能多样性与生态系统多功能性关系沿海拔梯度的变化. 植物生态学报, 47, 822-832. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0195

## Relationship between plant functional diversity and ecosystem multifunctionality in Bayanbulak alpine meadow along an altitude gradient

LÜ Zi-Li<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1\*</sup>, CHANG Feng<sup>1\*\*</sup>, MA Zi-Jing<sup>1</sup>, and CAO Qiu-Mei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology, Key Laboratory of Special Environment Biodiversity Application and Regulation in Xinjiang, College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Ürümqi 830054, China; and <sup>2</sup>Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830054, China

### Abstract

**Aims** The relationship between biodiversity and ecosystem function is one of the hotspots in ecological research. In the past, the research on the relationship between biodiversity and ecosystem function only focused on the experimental or observational investigation of single ecosystem function (SEF), ignoring the most essential value that ecosystem can provide multiple functions and services at the same time. Identifying the relationship between plant functional diversity and ecosystem multifunctionality (EMF) can provide a clear understanding of changes in ecosystem function.

**Methods** In this study, Bayanbulak alpine meadow was taken as the study area, and five altitude sites were set at an interval of 200 m from 2 194 to 3 062 m above sea level. Soil total nitrogen content, nitrate nitrogen content, ammonium nitrogen content, total phosphorus content, available phosphorus content, total potassium content, available potassium content, soil density, aboveground and underground biomass of plant community were selected to characterize EMF, which were closely related to nutrient cycling, soil organic carbon accumulation and

收稿日期Received: 2022-05-16 接受日期Accepted: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(32160271)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (32160271).

\* 通信作者Corresponding author (onlinelb@163.com)

\*\* 现工作单位: 莆田砺成中学, 福建莆田 351199。Current workplace: Putian Licheng Middle School, Fujian 351199.

plant growth.

**Important findings** (1) The species composition of the plant community varied greatly along the altitude gradient, and the species richness at the altitude of 2 600 m was significantly higher than that at the other altitudes. Functional evenness index (FEve), functional richness index (FRic) and functional dispersion index (FDis) all showed a “single peak” trend with the rise of altitude, and the highest values were found at 2 600, 2 800 and 2 800 m, respectively. Rao’ quadratic entropy (Rao’Q) showed a monotonically decreasing trend. (2) FRic and FDis at each altitude were positively correlated with soil EMF, which accounted for 47% and 43% of the variation in EMF, respectively. FEve was significantly correlated with nutrient cycling index and soil organic carbon storage index at the altitude of 2 600 m. Rao’Q at 3 000 m was significantly correlated with soil nutrient cycling index, organic carbon storage and EMF. The relationship between plant functional diversity and EMF along the altitude gradient was analyzed by constructing a structural equation model, which showed that altitude could exert impacts on EMF through changing functional diversity, with the greatest effect of functional richness on EMF. In conclusion, with the alteration of altitude, the functional diversity may result in changes, thereby affect the SEF and EMF, and the functional diversity is important to maintain the EMF.

**Key words** functional diversity; ecosystem multifunctional; single ecosystem function; altitude; alpine meadow

Lü ZL, Liu B, Chang F, Ma ZJ, Cao QM (2023). Relationship between plant functional diversity and ecosystem multifunctionality in Bayanbulak alpine meadow along an altitude gradient. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 822-832. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0195

在21世纪, 随着社会经济的快速发展, 由人类活动导致的物种灭绝和生态系统结构简化不断加剧, 生物多样性在人为的驱动下以一种前所未有的速度发生改变, 使得生态系统功能向难以预测的方向发展(雷玲洁等, 2016)。因此, 生物多样性的改变对生态系统功能的影响成为越来越多研究者探索的重点方向(李静鹏等, 2016)。生态系统最为重要的价值是提供多种生态功能和服务, 如同时提供土壤有机碳蓄积、净初级生产力、碳循环和氮循环等多种不同的功能或服务, 即生态系统多功能性(ecosystem multifunctionality, EMF) (Roscher *et al.*, 2012)。由于不同生态系统功能之间存在一定的权衡关系, 与单一生态系统功能(single ecosystem function, SEF)相比, EMF作为一个综合性考量指标, 能更全面地帮助我们从整体上理解和明确生物多样性与生态系统功能间的关系(Gamfeldt *et al.*, 2008)。因此相较于植物多样性和单一生态系统功能之间的关系, 研究植物多样性和EMF间的关系显得更为重要。但就当下研究情况来看, 大多数研究仅关注于生物多样性(物种多样性)与SEF的关系(例如: 氮累积、生产力等), 评价和研究生态系统多种功能的研究工作鲜有报道(刘旻霞等, 2022; 孙龙等, 2022)。生态系统功能不仅依赖于物种的数目, 更依赖于物种所具有的功能性状; 相比物种多样性, 功能多样性对于生态系统功能的贡献更大, 对功能多样性的定量测定可以准确反映群落功能对生态系统多功能发展的作用(李瑞新等, 2016)。因此, 在面对和解决与生态系统

功能相关的研究中, 越来越多的学者提倡用功能性状的多样性来代替物种多样性(Aiba *et al.*, 2012; Khalil *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2019)。这是因为功能多样性作为植物多样性中的一个重要组成部分, 不仅能有效地反映与生态系统多功能间的关系, 而且可以更深入地了解功能多样性在解释生态系统功能方面的优势(刘旻霞等, 2022)。因此, 通过研究功能多样性和EMF之间的关系, 可以更清晰、细致地阐释生态系统功能的变化。

巴音布鲁克高寒草甸位于天山南坡, 对维持高海拔地区生态平衡、养分循环以及生物多样性等具有重要意义, 其在维系我国西北干旱区流域生态环境安全等方面具有重要作用。与其他地区相比, 该地区草地生态系统更为脆弱、敏感。因其海拔在2 000–3 600 m范围, 有一定的高差, 所以是研究生物多样性海拔格局的理想场所(刘旻霞等, 2017; 郭婧等, 2020)。目前, 该区域对生物多样性-生态系统功能关系研究多集中于物种多样性层次, 并且仅考虑其与单一的生态系统功能(如生产力、土壤有机碳蓄积、土壤养分循环等)的关系(常凤, 2021), 至今功能多样性与EMF在不同生态系统中的关系格局仍未得到解决, 而且在高寒草甸生态系统中的相关研究还较为缺乏。为此, 本研究选取巴音布鲁克高寒草甸海拔梯度上的植物群落为研究对象, 分析在不同海拔高度上功能多样性与EMF的分布规律及相互间的关系, 以期进一步加深对植物群落功能多样性与高寒草甸EMF间关系的认识, 为

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0195

草地生物多样性及生态系统多功能保护提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

巴音布鲁克高寒草甸地处83.70°–85.85° E、42.98°–43.12° N, 海拔范围为2 000–3 600 m, 属于典型的高寒草甸, 全年积雪日达150–180天, 冬季长, 夏季短, 最高气温为30.5 °C, 最低气温可达–48 °C, 年平均气温–4.8 °C, 年降水量276 mm, 年蒸发量1 248 mm, 无绝对无霜期。该研究区域草地类型主要有高山草甸、亚高山草甸、亚高山草原化草甸等。

### 1.2 野外样地设置和植物群落调查

于2020年8–9月在巴音布鲁克山区进行植被和土壤的调查, 选择植被过渡明显的5个海拔高度(2 200、2 400、2 600、2 800、3 000 m), 每个海拔处选取坡向、土地利用强度、人为干扰尽可能相同的3个地点设置研究样地(20 m × 20 m), 在每个样地的对角线上设置3个5 m × 5 m的样方, 在每个样方内按梅花状设置5个1 m × 1 m的小样方。5个海拔共设置了15个样地, 225个样方。记录各个样方的生物信息(如: 植被类型、物种数量、盖度、高度等)和地理信息(如: 海拔、经度、纬度等) (表1)。在每个小样方内, 选取样方中盖度比较大的物种, 采集

10株正常发育、无病虫害的健康植株(未达到10株的个体在样方附近采集), 在每个物种的不同高度随机采取10–15片成熟完整的叶片, 装入保鲜箱内带回实验室。将样方内植物齐地刈割, 翻土后获取植株地下部分, 将样品立即冲洗漂净并将根系分离, 在野外风干后带回实验室。在每个样方的中心区域取0–30 cm土壤样品200 g带回实验室, 在室温条件下将样地中采集的土样自然风干, 剔除土壤中杂质, 物理研磨后过60目筛, 分装密封袋中用于后续指标的测定(黄超等, 2020)。此外, 在样方内挖掘土壤剖面, 用直径为7.5 cm的环刀获取土壤样品(0–30 cm), 用以测定土壤密度及砾石比。

### 1.3 实验方法

采用CI-203手持式激光叶面积仪(CID, Waltham, USA)测定叶面积; 选用精度为0.000 1 g的电子天平称量叶片鲜质量, 然后将新鲜叶片样品置于60 °C的烘箱中烘干至恒质量, 时间一般为72 h, 并称取叶片干质量(LDM)。计算比叶面积(SLA)、叶片含水量(LWC)和叶干物质含量(LDMC)。用HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消化法测量叶片氮(N)含量; 用酸溶-钼锑抗比色法测定叶片磷(P)含量; 用重铬酸钾容量-外加加热法测定叶片碳(C)含量。

将获取的植株地上、地下部分放入烘箱, 在105 °C下杀青30 min, 之后在65 °C下烘48 h以上直至恒质量并称量。

将处理过的土样参照土壤农化分析进行土壤养分的测定(鲍士旦, 2005), 土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾容量-外加加热法测定; 全氮(TN)含量采用HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消化法, 使用福斯1035全自动定氮仪(KDN-102F, 福斯, 上海)测定; 铵态氮(AN)含量采用2 mol·L<sup>-1</sup> KCl浸提-靛酚蓝比色法测定; 硝态氮(NN)含量采用双波长紫外分光光度法测定; 全磷(TP)含量采用酸溶-钼锑抗比色法, 使用安捷伦CARY60紫外分光光度计(Agilent, Santa Clara, USA)测定; 速效磷(AP)含量采用NaOH浸提-钼锑抗比色法, 使用安捷伦CARY60紫外分光光度计测定; 全钾(TK)用NaOH溶解后采用火焰光度法测定含量; 速效钾(AK)含量采用火焰原子吸收光谱法测定。土壤密度样品在65 °C恒温烘干后称量, 使用烘干后样品测定土壤砾石比。通过平均SOC含量与土壤密度计算单位体积土壤碳含量(USCA, kg·m<sup>-3</sup>), 计算公式如下:

表1 巴音布鲁克高寒草甸各样地地理信息列表

Table 1 List of geographic information for sample plots in Bayanbulak alpine meadow

编号 Plot No.	海拔 Altitude (m)	经度 Longitude (° E)	纬度 Latitude (° N)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)
2200-1	2 194.12	83.86	42.35	阳坡 Sunny slope	13.2
2200-2	2 203.71	83.86	42.34	阳坡 Sunny slope	3.1
2200-3	2 210.63	83.85	42.34	阳坡 Sunny slope	5.4
2400-1	2 406.20	83.53	42.68	阳坡 Sunny slope	7.2
2400-2	2 400.90	83.53	42.68	阳坡 Sunny slope	12.1
2400-3	2 415.20	84.39	43.05	阳坡 Sunny slope	10.7
2600-1	2 590.42	84.05	43.05	阳坡 Sunny slope	7.9
2600-2	2 602.60	82.97	42.86	阳坡 Sunny slope	9.4
2600-3	2 597.20	84.05	42.85	阳坡 Sunny slope	6.7
2800-1	2 794.62	82.99	42.86	阳坡 Sunny slope	3.9
2800-2	2 817.50	82.99	42.87	阳坡 Sunny slope	8.4
2800-3	2 802.00	82.97	42.87	阳坡 Sunny slope	17.5
3000-1	3 052.70	83.47	42.51	阳坡 Sunny slope	10.6
3000-2	3 062.10	83.47	42.51	阳坡 Sunny slope	9.5
3000-3	3 004.12	83.03	42.51	阳坡 Sunny slope	7.7

$$USCA = TOC \times \Delta d \times S \times \rho \times 10^3 \quad (1)$$

式中, TOC指计算深度内土壤平均有机碳含量(%);  $\Delta d$ 为所取土壤深度(m);  $\rho$ 为土壤密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $S$ 为环刀底面积( $\pi \times 0.0375^2 \text{ cm}^2$ ).

#### 1.4 功能特征数据的获取和功能多样性指数的计算

植物物种的种子扩散方式、传粉方式、生活型、株高、比叶面积、叶干物质含量等功能性状依据Cornelissen等(2003)创建的植物性状标准进行选择测定。植物群落功能多样性的研究选取体现群落功能性状的功能丰富度指数(FRic)、功能均匀度指数(FEve)、功能分散度指数(FDis)和体现物种间功能性状相似程度的二次熵函数(Rao'Q)来表达(李瑞新等, 2016)。各指数具体计算公式如下:

$$\text{FRic} = \text{SF}_{ce} / R_c \quad (2)$$

$$\text{FEve} = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} \min \left( \text{PEW}_i \times \frac{1}{S-1} \right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}} \quad (3)$$

$$\text{FDis} = \frac{\sum_{j=1}^s a_j z_j}{\sum_{j=1}^s a_j} \quad (4)$$

$$\text{Rao'Q} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s d_{ij} P_i P_j \quad (5)$$

式中,  $\text{SF}_{ce}$ 为群落 $e$ 内性状 $c$ 所占据的生态位空间,  $R_c$ 为性状 $c$ 的绝对值,  $S$ 为物种丰富度,  $\text{PEW}_i$ 为物种 $i$ 的加权均匀度,  $a_j$ 为物种 $j$ 的多度,  $z_j$ 为物种 $j$ 到加权质心的距离,  $d_{ij}$ 为物种 $i$ 和物种 $j$ 的功能性状差异程度,  $P_i$ 和 $P_j$ 为物种 $i$ 和 $j$ 的相对多度。

#### 1.5 生态系统功能指标的选取和EMF计算

结合以往的研究, 现在对EMF的量化评定主要有阈值法和指标权重平均值法。阈值法是将所有功能的作用都视为等效, 无法反映特定生态系统功能或服务的重要性, 因没有确定的标准阈值, 计算的生态系统功能值会随阈值的选择而变化, 容易受到研究者主观态度的影响(Byrnes *et al.*, 2014; 孙龙等, 2022); 相比阈值法, 指标权重平均值法计算得到的EMF指数具有较好的统计学特性, 计算简便, 不会改变原始数据的变异程度, 且能够清晰直观地表征植物群落提供多种生态系统功能和服务的能力(Byrnes *et al.*, 2014), 因此本研究使用指标权重平均值法来量化EMF。选取10个生态系统功能指标综合量化多个SEF。其中采用地上生物量和地下生物量

来表征植物生长功能(熊定鹏等, 2016), 单位土壤碳含量用于表征土壤有机碳蓄积功能, 土壤全氮、氨态氮、硝态氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾含量用于表征土壤养分循环功能(Hou *et al.*, 2021)。随后再对选取的10个生态系统功能指标参数使用指标权重平均值法来量化EMF。量化EMF前需对各样方内的各功能指标参数进行标准化处理, 然后再将15个调查样地中10种生态系统功能指标参数转化为标准Z分数。Z值计算公式如下:

$$Z_{xy} = (F_{xy} - \mu_y) / \sigma_y \quad (6)$$

式中,  $Z_{xy}$ 为样地 $x$ 第 $y$ 种生态系统功能参数的Z分数,  $x$ 的范围在1–15,  $y$ 的范围在1–10;  $F_{xy}$ 为样地 $x$ 第 $y$ 种生态系统功能参数的数值;  $\mu_y$ 为第 $y$ 种生态系统功能参数在15个样地间的平均值;  $\sigma_y$ 为第 $y$ 种生态系统功能参数在15个样地间的标准差。对每一样地10种不同生态系统功能参数的Z分数求其综合平均值, 即为各样地的EMF, EMF值计算公式如下:

$$\text{EMF} = \sum_{y=1}^{10} Z_{xy} / 10 \quad (7)$$

#### 1.6 数据处理

在Excel 2019中进行数据整理。计算各海拔优势种的重要值(即相对盖度、相对多度和相对高度三者之和的加权平均); 利用R 4.1.3 “FD”程序包中dbFD函数计算功能多样性指数; 采用单因素方差分析检验物种功能多样性指数在海拔梯度上是否具有显著性差异; 采用Pearson相关性分析及一元线性回归分析功能多样性指数与EMF指数间的关系。此外, 用10个生态系统功能指标间的组合权重平均值量化植物生长、养分循环和土壤有机碳蓄积这3种重要的生态系统功能, 并将这3种生态系统功能参数量化后产生的3种SEF分别与不同功能多样性指数进行相关性分析与回归分析; 考虑到功能多样性各指数与海拔间可能存在交互作用, 对EMF可能产生影响, 故采用R 4.1.3中的“plyr”包进行协方差分析, 探讨海拔与功能多样性指数间是否存在交互作用; 同时利用“lavaan”包构建结构方程模型, 分析海拔、功能多样性与EMF间的关系, 以揭示海拔对功能多样性和EMF的影响。

## 2 结果和分析

### 2.1 植物群落物种组成及丰富度沿海拔梯度的变化

在海拔2 194–3 062 m范围内的15个样地中共调

查到52种物种, 隶属于20科26属。由表2可知, 低海拔地区(2 200–2 400 m)和高海拔地区(2 800–3 000 m)植物群落物种组成差异较大。低海拔地区主要以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、丘陵老鹳草(*Geranium*

表2 巴音布鲁克高寒草甸不同海拔样地植物群落优势种组成  
Table 2 Composition of dominant species of plant community in Bayanbulak alpine meadow at different altitudes

海拔 Altitude (m)	物种丰富度 (平均值±标准差) Specie richness (mean ± SD)	优势种(重要值) Dominant species (importance value)
2 200	15.00 ± 2.00 <sup>a</sup>	薹草 <i>Carex</i> sp. (0.212 5) 线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> (0.187 5)
2 400	14.49 ± 2.33 <sup>ab</sup>	丘陵老鹳草 <i>Geranium collinum</i> (0.212 2) 线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> (0.186 3)
2 600	16.13 ± 3.14 <sup>ab</sup>	线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> (0.251 6) 薹草 <i>Carex</i> sp. (0.145 8)
2 800	15.17 ± 1.47 <sup>a</sup>	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i> (0.276 5) 针茅 <i>Stipa</i> sp. (0.266 0)
3 000	12.25 ± 2.87 <sup>b</sup>	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i> (0.349 0) 丘陵老鹳草 <i>Geranium collinum</i> (0.188 1)

不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。  
Different lowercase letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ ).

*collinum*)、多裂委陵菜(*Potentilla multifida*)、茸毛委陵菜(*Potentilla strigosa*)为主。随着海拔的升高群落优势种发生了更替, 逐渐变为珠芽蓼(*Polygonum vivipara*)占优势。除此之外, 随着海拔上升, 物种丰富度呈单峰变化趋势, 峰值(16.13 ± 3.14)出现在海拔2 600 m处。

2.2 植物群落功能多样性沿海拔梯度的变化

由图1可知, 随海拔升高, 功能多样性指数发生显著变化。FRic由大到小为2 800 m > 2 600 m > 2 400 m > 2 200 m > 3 000 m, 呈现出单峰变化趋势; 海拔2 200 m处与海拔2 600 m、2 800 m处的FRic存在极显著差异, 2 800m处与3 000m处存在极显著差异。FDis与FRic的变化趋势相同, 峰值出现在2 800 m处, 海拔2 800m处与3 000m处存在极显著差异。不同海拔段FEve值的大小为2 600 m > 2 800 m > 2 400 m > 2 200 m > 3 000 m, 大部分海拔段间存在显著差异。除此之外, 随着海拔的增加, Rao'Q逐渐降低, 海拔2 200 m与2 600m、2 800m、3 000m处均存在极显著差异, 2 400m处与3 000m处存在极显著差异。

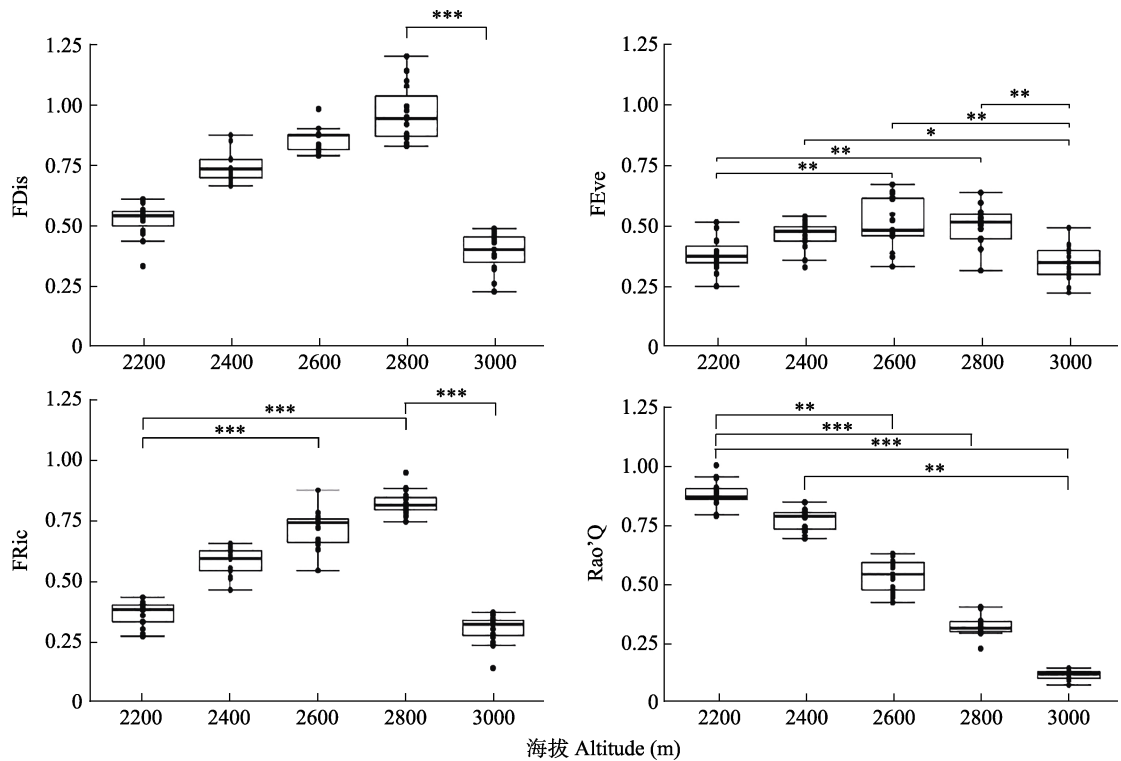


图1 巴音布鲁克高寒草甸不同海拔样地植物群落的功能多样性指数(平均值±标准差)。FDis, 功能分散度指数; FEve, 功能均匀度指数; FRic, 功能丰富度指数; Rao'Q, Rao的二次熵。\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ 。  
Fig. 1 Distribution of functional diversity index of plant communities at different altitudes in Bayanbulak alpine meadow (mean ± SD). FDis, functional dispersion index; FEve, functional evenness index; FRic, functional richness index; Rao'Q, Rao's quadratic entropy. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ .

### 2.3 功能多样性指数与SEF、EMF指数间的关系

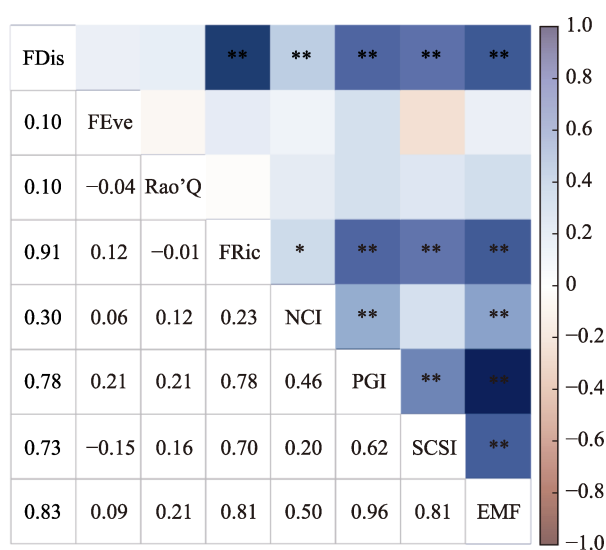
通过对功能多样性指数与SEF、EMF指数间进行Pearson相关性分析与回归分析(图2, 图3)可知, FRic与养分循环指数存在显著相关关系, 与EMF指数、有机碳蓄积、植物生长指数存在极显著的正相关关系, 且对EMF指数变化的解释程度约47%; FDis与养分循环、有机碳蓄积、植物生长指数间均存在极显著相关关系, 与EMF指数也呈现出极显著正相关关系, 解释了约43% EMF指数的变化。除此之外, FEve、Rao'Q与EMF指数均未表现出显著相关性。

考虑到不同海拔间各生态系统功能指数与功能多样性指标存在自相关性, 为检验上述结果, 将功能多样性指标和生态系统功能指标分海拔整理后进行相关性分析(表3)可知, 不同海拔上植物功能多样性指数与生态系统功能指数(SEF、EMF)相关性与上述结果类似, 各海拔样地FRic、FDis与大部分生态系统功能性指数间存在显著相关关系, 仅在海拔2 600 m处FEve与养分循环指数、土壤有机碳蓄积指

数存在显著相关性; 海拔3 000 m处Rao'Q指数与养分循环、有机碳蓄积、EMF均存在显著相关性。

### 2.4 海拔对植物群落功能多样性与EMF的影响

通过协方差分析可知, 除FDis与FRic间存在较为显著的交互作用( $F = 5.2512, p < 0.05$ )外, 其余功能多样性指数间以及与海拔变量间的交互作用并不明显。通过两种独立的结构方程模型(完全中介: 海拔对EMF的影响仅通过功能多样性指数完全传递; 部分中介: 海拔对EMF的影响分为以功能多样性指数为中介的间接影响和直接影响)同时进行海拔与植物群落功能多样性指数对EMF影响的拟合, 由结果(表4)可知, 完全中介模型的自由度( $df$ )为15, 拟合优度指数(GFI)为0.92, 标准化均方根残差为0.08, 相比部分中介模型具有较好的拟合度。同时, 为验证海拔对植物群落功能多样性和EMF的影响程度, 构建结构方程模型进行进一步的验证(图4)。在完全中介模型中, 海拔对FRic存在极显著的正向直接效应(标准路径系数( $Est.std$ ) = 0.067), 同时FRic对EMF存在极显著积极影响( $Est.std$  = 0.475); 海拔对Rao'Q影响也极为显著( $Est.std$  = -0.980), 同时Rao'Q对EMF有显著积极影响( $Est.std$  = 0.05)。这表明在本研究样地, 海拔的中介效应可通过FRic和Rao'Q传递给EMF。除此之外, 海拔对FEve和FDis表现出不显著的负效应。但FEve、FDis对EMF均具有极显著的正向直接效应, 其 $Est. std$ 依次为0.127、0.283。



**图2** 巴音布鲁克高寒草甸群落功能多样性指数与单一生态系统功能(SEF)、生态系统多功能性(EMF)指数间的相关性分析。FDis, 功能分散度指数; FEve, 功能均匀度指数; FRic, 功能丰富度指数; NCI, 养分循环指数; PGI, 植物生长指数; Rao'Q, Rao的二次熵; SCSi, 土壤有机碳蓄积指数。\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ 。

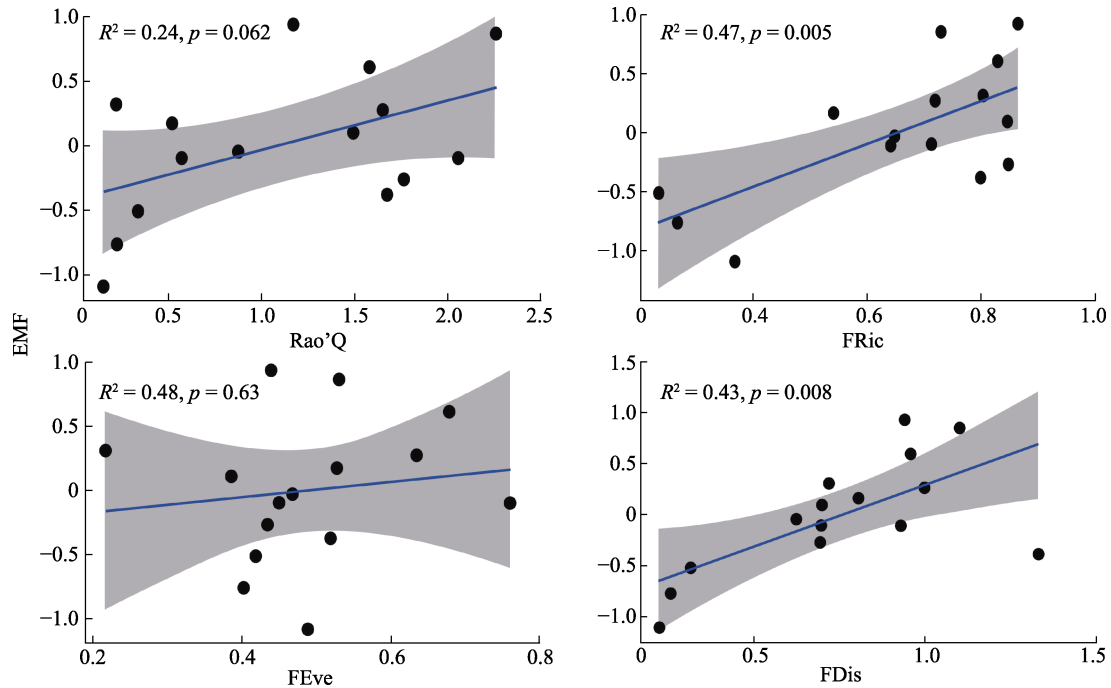
**Fig. 2** Correlation analysis between community functional diversity index and single ecosystem function (SEF) and ecosystem multifunctionality (EMF) index in Bayanbulak alpine meadow. FDis, functional dispersion index; FEve, functional evenness index; FRic, functional richness index; NCI, nutrient cycling index; PGI, plant growth index; Rao'Q, Rao's quadratic entropy; SCSi, soil carbon stock index. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ .

## 3 讨论

### 3.1 植物群落组成与功能多样性沿海拔梯度的变化

海拔是影响山地植物分布的重要因子, 海拔的变化通常会引起水热条件、土壤养分等多种环境因子发生变化, 造成环境的异质性, 进一步影响了植物群落的结构、群落稳定性和多样性。在本研究中, 不同海拔样方内植物群落类型的物种组成和结构存在差异。物种丰富度指数沿海拔变化显著, 呈现“单峰型”变化趋势, 在中海拔2 600 m处物种丰富度指数达到最大, 这与刘旻霞等(2022)对海拔梯度上甘南高寒草甸功能多样性与EMF关系研究结果一致。主要是因为低海拔热量足够, 环境条件相对较好, 但存在水分蒸发量较高现象; 同时, 随着优势物种的出现, 群落中大量的生态位被其占据; 此外, 低海拔段(2 200–2 400 m)存在相对较强的人为干扰,





**图3** 巴音布鲁克高寒草甸群落功能多样性指数与生态系统多功能性指数(EMF)间的回归分析。FDis, 功能分散度指数; FEve, 功能均匀度指数; FRic, 功能丰富度指数; Rao's Q, Rao的二次熵; 灰色部分代表置信区间。  
**Fig. 3** Regression analysis of community functional diversity index and ecosystem multifunctional index (EMF) in Bayanbulak alpine meadow. FDis, functional dispersion index; FEve, functional uniformity index; FRic, functional richness index; Rao's Q, Rao's quadratic entropy; the gray part represents the confidence interval.

**表3** 巴音布鲁克高寒草甸不同海拔功能多样性指数与生态系统多功能性指数(EMF)间相关性分析  
**Table 3** Correlation analysis between functional diversity index and ecosystem multifunctional index (EMF) at different altitudes in Bayanbulak alpine meadow

海拔 (m) Altitude	生态系统功能指数 Ecosystem function index	功能多样性指数 Functional diversity index			
		FRic	FDis	FEve	Rao's Q
2 200	EMF	0.025 0*	0.882 9*	0.139 4	0.352 2*
	植物生长 Plant growth	0.984 9*	0.947 7*	0.904 3	-0.705 4
	养分循环 Nutrient cycling	0.852 0*	0.638 2*	0.890 6	-0.707 8
	有机碳蓄积 Soil carbon stock	0.918 4***	0.820 7*	0.934 5	-0.577 2
2 400	EMF	0.957 3**	0.926 7*	-0.280 9	0.162 8
	植物生长 Plant growth	0.938 5***	0.843 0***	-0.248 2	0.201 0
	养分循环 Nutrient cycling	0.867 3***	0.968 4***	-0.323 6	0.011 4
	有机碳蓄积 Soil carbon stock	-0.568 1*	-0.642 5**	-0.186 3	0.137 0
2 600	EMF	0.080 7*	0.244 9	0.265 8	0.152 0
	植物生长 Plant growth	0.099 7*	0.004 5	-0.100 6	0.176 0
	养分循环 Nutrient cycling	0.168 0	0.078 8**	0.262 3**	0.184 9
	有机碳蓄积 Soil carbon stock	0.171 4**	0.080 3*	0.257 2*	0.268 7
2 800	EMF	0.585 7**	0.222 7	0.373 7	-0.449 0
	植物生长 Plant growth	0.345 3	0.194 2	-0.004 2	-0.238 8
	养分循环 Nutrient cycling	0.961 4***	0.504 5	0.203 5	-0.161 9
	有机碳蓄积 Soil carbon stock	0.523 5*	0.220 6	0.495 6	-0.486 0
3 000	EMF	0.868 2*	0.918 5*	-0.044 4	0.695 3*
	植物生长 Plant growth	0.952 1**	0.975 1***	0.054 0	0.690 9
	养分循环 Nutrient cycling	0.782 2**	0.838 6***	-0.267 6	0.668 2**
	有机碳蓄积 Soil carbon stock	0.856 8*	0.927 4**	0.005 6	0.734 5**

\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ . FDis, 功能分散度指数; FEve, 功能均匀度指数; FRic, 功能丰富度指数; Rao's Q, Rao的二次熵。  
\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ . FDis, functional dispersion index; FEve, functional uniformity index; FRic, functional richness index; Rao's Q, Rao's quadratic entropy.

表4 巴音布鲁克高寒草甸海拔对功能多样性与生态系统多功能(EMF)影响的结构方程模型概述

Table 4 A summary of structural equation model of the effect of altitude on functional diversity and ecosystem multifunctional index (EMF) in Bayanbulak alpine meadow

关系 Regression	完全中介模型 Full mediation model ( $df=15$ , SRMR = 0.08, GFI = 0.92)			部分中介模型 Partial mediation model ( $df=13$ , SRMR = 0.08, GFI = 0.81)		
	Est. std	SE	$p$	Est. std	SE	$p$
Alt-FRic	0.067	0.127	0.008	0.004	0.059	0.952
Alt-FEve	-0.044	0.111	0.147	-0.015	0.029	0.606
Alt-FDis	-0.049	0.129	0.309	-0.080	0.058	0.165
Alt-Rao'Q	-0.980	0.023	<0.001	-0.980	0.023	0.000
FRic-EMF	0.475	0.275	<0.001	0.506	0.161	0.002
FEve-EMF	0.127	0.089	<0.001	0.143	0.084	0.087
FDis-EMF	0.283	0.274	<0.001	0.233	0.167	0.163
Rao'Q-EMF	0.050	0.570	0.017	0.067	0.068	0.325
Alt-EMF				0.007	0.400	0.857

Alt, 海拔; FDis, 功能分散度指数; FEve, 功能均匀度指数; FRic, 功能丰富度指数; Rao'Q, Rao的二次熵,  $df$ , 自由度; Est.std, 标准路径系数; GFI, 拟合优度指数;  $p$ , 给定模型的数据概率; SE, 标准误; SRMR, 标准化均方根残差。

Alt, altitude; FDis, functional dispersion index; FEve, functional uniformity index; FRic, functional richness index; Rao'Q, Rao's quadratic entropy;  $df$ , degree of freedom; Est.std, standard path coefficient; GFI, goodness-of-fit index;  $p$ , probability for a given model; SE, standard error; SRMR, standardized root mean square residual.

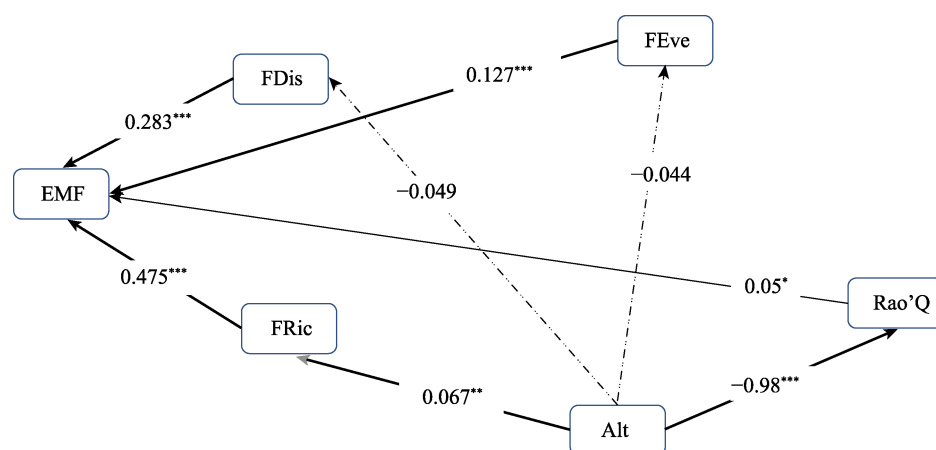


图4 巴音布鲁克高寒草甸海拔对功能多样性指数和生态系统多功能性指数(EMF)影响的结构方程模型图。Alt, 海拔; FDis, 功能分散度; FEve, 功能均匀度; FRic, 功能丰富度; Rao'Q, Rao的二次熵。箭头旁边的数字为标准化路径系数(正值代表正效应, 负值表示负效应)。实线代表存在显著相关性, 虚线代表不存在显著相关性。箭头的粗细代表显著性差异(粗代表显著性高, 细代表显著性低)。\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ 。

**Fig. 4** Structural equation model diagram of the effect of altitude on functional diversity index and ecosystem multifunctional index (EMF) in Bayanbulak alpine meadow. Alt, altitude; FDis, functional dispersion; FEve, functional uniformity; FRic, functional richness; Rao'Q, Rao's quadratic entropy. The number next to the arrow in the plot is the normalized path coefficient (positive values represent positive effects, negative values represent negative effects). A solid line indicates a significant correlation, and a dashed line indicates no significant correlation. The thickness of the arrow represents significant difference (thick represents high significance, thin represents low significance). \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ .

造成物种缺失; 高海拔段(2 800–3 000 m)虽然水分含量有所增加, 但是风速大, 温度低, 生境较为严苛, 环境筛选对该地区群落构建起到决定性作用, 呈现出物种丰富度较低的现象; 而在中海拔段(2 600–2 800 m), 人为干扰程度较低, 水热条件相较于高、低海拔更为均衡, 适宜植物生长, 因此物种

丰富度相对较高。

功能多样性可清晰直观地表征群落中物种的分布与生态系统功能间的关系, 为生态系统平衡提供理论基础(Klimešáková *et al.*, 2008)。FRic通过量化群落中现有物种占据的生态位空间大小来反映植被对资源的利用率(Aiba *et al.*, 2012)。本研究表明, 由于



环境因子与群落物种组成间相互作用, 导致随着海拔高度的增加, FRic总体呈现先上升后下降的“单峰”趋势。中低海拔范围内(2 200–2 600 m)随着物种丰富度增加, 种间竞争越发激烈, 导致生态位分化, 物种性状分化的范围也随之增加。高海拔段物种丰富度降低, 种间竞争强度下降; 同时由于严苛的生境条件, 环境筛的作用愈发显著, 促使物种的功能性状发生趋同化现象, 功能丰富度指数降低, 出现不同程度的生态位重叠现象, 这在一定程度上会降低植物群落物种的功能多样性。

FEve可衡量物种在空间中的特征分布, 是衡量生产力恢复、抵御外来物种入侵的重要指标(Zhang *et al.*, 2021)。本研究中, FEve随着海拔的上升呈现出“单峰”变化趋势, 这与秦浩等(2019)在山西关帝山森林群落物种、谱系和功能多样性海拔格局的研究中得到的结论相同。出现这种现象可能是因为在海拔2 600 m处物种丰富度达到最高, 同时, 该海拔段处于过渡段, 群落组成兼有适应高海拔和低海拔不同环境的物种, 表现出较高的均匀度; 对于其他海拔段而言, 低海拔段(2 200–2 400 m)由于水热条件和人为干扰的影响, 高海拔段(2 800–3 000 m)由于有环境筛的影响, 导致FEve均较低。

Rao'Q指数表示群落生态位的重叠程度。物种的生态位重叠程度越强, 资源竞争越强, Rao'Q指数较低(董世魁等, 2019)。本研究中, Rao'Q指数随海拔上升呈现下降的趋势, 这与刘旻霞等(2022)针对甘南高寒草甸海拔梯度上功能多样性与生态系统多功能关系的研究结果相同。低海拔段(2 200–2 400 m) Rao'Q指数较高是因为该地区植物具有较高的资源利用效率, 所以种间、种内资源竞争强度较弱; 相较于中、低海拔段(2 200–2 600 m), 高海拔段(2 800–3 000 m)环境相对恶劣, 物种丰富度相对较低, 同时为了适应该地区的环境, 各种植物产生趋同进化效应, 演变出相似的形态结构和功能特征, 导致互补性降低, 植物群落物种趋于单一, 对资源的利用效率减弱, 资源竞争性增强。

### 3.2 植物群落功能多样性与EMF的关系

在巴音布鲁克高寒草甸, 不同海拔功能多样性指数与EMF间关系格局存在部分差异。本研究发现, 功能多样性指数均与EMF呈正相关关系。其中FRic与EMF间相关性最强且线性回归关系最显著, 是维持较高EMF的一个重要元素。除此之外, FDis与

EMF也存在显著正相关关系。研究结果表明, 巴音布鲁克高寒草甸EMF主要受群落功能数量和功能分散程度的影响, 而非功能性状分布的均匀程度影响。本研究结果与刘旻霞等(2022)针对甘南高寒草甸海拔梯度上功能多样性与EMF的关系所得结果相一致, 表明群落功能多样性越高, 植物功能性状的中间变异程度越高, 功能性状越分散, 生态位分化越强, 这使得植物群落物种能够充分利用环境资源; 而FRic越高, 个体物种特征叠加后, 群落整体功能特征越丰富, 生态位将被完全占据, 生态系统功能将更加稳定。研究结果验证了在干旱草地生态系统中互补效应作为植物群落功能多样性与EMF关系维持的一种重要机制, 同时也支持了Huang等(2019)在对功能多样性如何驱动云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林EMF的研究中得到的结论: FRic相比于其他功能多样性指数可以更好地预测EMF。FEve可以衡量植物性状在所占用空间中的分布, 功能均匀度越高, 植物性状的分布规律性越强, 各种自然资源的利用程度越接近。在本研究中, 在2 600 m处FEve与有机碳蓄积之间存在极显著的相关关系, 表明群落功能多样性对生态系统功能有积极的影响, 这与艾比湖流域功能丰富度与有机碳蓄积显著相关的结果(许戡, 2017)相一致; 研究结果表明, 无论是高寒草甸还是热带雨林区, 功能均匀度对土壤有机碳蓄积都有显著影响。

### 3.3 功能多样性介导的海拔对EMF的影响

结构方程模型是一种功能强大的多元统计模型, 越来越多地出现在生态学研究, 用于测试和评估多变量间的因果关系。结合Wondimu等(2021)的研究, 本研究假设海拔对EMF的影响可以通过功能多样性来介导, 因此使用了完全中介和部分中介两种模型来测试验证。本研究通过比较两种结构方程模型分析结果发现, 在考虑了环境驱动因素(海拔)的影响后, 相比于完全中介模型, 部分中介模型的拟合效果较差, 同时功能多样性指数对EMF的影响发生改变, 即减弱了两者之间的关系, 这与刘阳等(2021)针对生物多样性与环境驱动因素对内蒙古草原EMF变化的研究结果相同; 同时研究结果也验证了Wondimu等(2021)的物种多样性通过功能多样性对埃塞俄比亚常绿林中地上碳储量影响的结果, 即环境因素的引入会降低多样性对EMF的关系。这可能是因为功能多样性对EMF的部分影响被海拔变

化所引起的环境因素与气候因素的改变所掩盖 (Lepš, 2004), 因此, 在区域水平上, 海拔可能是巴音布鲁克草原EMF的关键驱动因素。通过结构方程模型也验证了该研究区EMF受生物因子中的FRic影响最为显著; 同时也表现出海拔可通过对FRic与Rao'Q施加影响, 进而间接影响到EMF。这表明海拔的改变会通过功能多样性这一媒介作用于EMF。研究结果同时也验证了生态位互补效应是维持EMF的重要机制(Cardinale *et al.*, 2011; Wondimu *et al.*, 2021)。

## 4 结论

综上所述, 在巴音布鲁克高寒草甸, 功能多样性会沿海拔梯度发生明显变化, 进而影响SEF和EMF; 功能多样性对于维持EMF具有重要意义, 除FEve与土壤有机碳蓄积间呈现出不显著的负相关外, 其他功能多样性指数均与SEF和EMF呈正相关关系, 其中FRic和FDis是影响EMF的重要因子, 也是维持EMF的关键元素; 表明维持EMF需要更丰富的物种功能性状特性和分散程度, 互补效应在高寒草甸EMF维持中更为重要。

**致谢** 感谢新疆师范大学博士启动基金项目(XJNBS1813)和干旱区植物逆境生物学实验室的资助。

## 参考文献

- Aiba M, Takafumi H, Hiura T (2012). Interspecific differences in determinants of plant species distribution and the relationships with functional traits. *Journal of Ecology*, 100, 950-957.
- Bao SD (2005). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. 9-54. [鲍士旦 (2005). 土壤农化分析. 3版. 中国农业出版社, 北京. 9-54.]
- Byrnes JEK, Gamfeldt L, Isbell F, Lefcheck JS, Griffin JN, Hector A, Cardinale BJ, Hooper DU, Dee LE, Duffy JE (2014). Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 111-124.
- Cardinale BJ, Matulich KL, Hooper DU, Byrnes JE, Duffy E, Gamfeldt L, Balvanera P, O'Connor MI, Gonzalez A (2011). The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 98, 572-592.
- Chang F (2021). *Relationship Between Plant Diversity and Productivity of Gentianella turkestanorum Adaptive Communities in Bayinbulak Mountains of Xinjiang*. Master degree dissertation, Xinjiang Normal University, Ürümqi. [常凤 (2021). 天山巴音布鲁克新疆假龙胆适生地群落植物多样性与生产力的关系. 硕士学位论文, 新疆师范大学, 乌鲁木齐.]
- Cornelissen JHC, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich DE, Reich PB, Steege HT, Morgan HD, Heijden MGA, Pausas JG, Poorter H (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335-380.
- Dong SK, Tang L, Zhang XF, Liu SL, Liu QR, Su XK, Zhang Y, Wu XY, Zhao ZZ, Li Y, Sha W (2017). Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 1472-1483. [董世魁, 汤琳, 张相铎, 刘世梁, 刘全儒, 苏旭坤, 张勇, 武晓宇, 赵珍珍, 李钰, 沙威 (2017). 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. 生态学报, 37, 1472-1483.]
- Gamfeldt L, Hillebrand H, Jonsson PR (2008). Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning. *Ecology*, 89, 1223-1231.
- Guo J, Zhang Q, Song MH, Shi Y, Zhou BR, Wang WY, Li YK, Zhao XQ, Zhou HK (2020). Status and function improvement technology of the grassland ecosystem in the upper Yellow River Basin. *Acta Agrestia Sinica*, 28, 1173-1184. [郭婧, 张骞, 宋明华, 师燕, 周秉荣, 王文颖, 李以康, 赵新全, 周华坤 (2020). 黄河上游草地生态现状及功能提升技术. 草地学报, 28, 1173-1184.]
- Hector A, Bagchi R (2007). Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 448, 188-190.
- Hou ZF, Lv GH, Jiang LM (2021). Functional diversity can predict ecosystem functions better than dominant species: the case of desert plants in the Ebinur Lake Basin. *Sustainability*, 13, 2858. DOI: 10.3390/su13052858.
- Huang C, Wei H, Wu KJ, He XR, Wang P, Qi YC, Qi HD (2020). The functional diversity of understory plants during the transition from *Pinus massoniana* to *Cinnamomum camphora* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 4573-4584. [黄超, 魏虹, 吴科君, 何欣芮, 汪鹏, 蔡远才, 齐代华 (2020). 马尾松林向香樟林改造林下植物功能多样性研究. 生态学报, 40, 4573-4584.]
- Huang XB, Su JR, Li SF, Liu WD, Lang XD (2019). Functional diversity drives ecosystem multifunctionality in a *Pinus yunnanensis* natural secondary forest. *Scientific Reports*, 9, 6979. DOI: 10.1038/s41598-019-43475-1.
- Khalil MI, Gibson DJ, Baer SG, Willand JE (2018). Functional diversity is more sensitive to biotic filters than phylogenetic diversity during community assembly. *Ecosphere*, 9, e02164. DOI: 10.1002/ecs2.2164.
- Klimešáková J, Latzel V, de Bello F, van Groenendael JM

- (2008). Plant functional traits in studies of vegetation changes in response to grazing and mowing: towards a use of more specific traits. *Preslia*, 80, 245-253.
- Lei LJ, Kong DL, Li XM, Zhou ZX, Li GY (2016). Plant functional traits, functional diversity, and ecosystem functioning: current knowledge and perspectives. *Biodiversity Science*, 24, 922-931. [雷羚洁, 孔德良, 李晓明, 周振兴, 李国勇 (2016). 植物功能性状、功能多样性与生态系统功能: 进展与展望. 生物多样性, 24, 922-931.]
- Lepš J (2004). What do the biodiversity experiments tell us about consequences of plant species loss in the real world? *Basic and Applied Ecology*, 5, 529-534.
- Li H, Yu YH, Long J, Li J (2021). Responses of leaf functional traits of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* to premature senescence. *Chinese Journal of Ecology*, 40, 1695-1704. [李红, 喻阳华, 龙健, 李娟 (2021). 顶坛花椒叶片功能性状对早衰的响应. 生态学杂志, 40, 1695-1704.]
- Li JP, Zheng ZR, Zhao NX, Gao YB (2016). Relationship between ecosystem multifunctionality and species diversity in grassland ecosystems under land-use types of clipping, enclosure and grazing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 735-747. [李静鹏, 郑志荣, 赵念席, 高玉葆 (2016). 刈割、围封、放牧三种利用方式下草原生态系统的多功能性与植物物种多样性之间的关系. 植物生态学报, 40, 735-747.]
- Li RX, Ding Y, Ma WJ, Niu JM, Zhang Q (2016). Research advances in plant functional diversity and its relationship with ecosystem functions. *Ecology and Environmental Science*, 25, 1069-1075. [李瑞新, 丁勇, 马文静, 牛建明, 张庆 (2016). 植物功能多样性及其与生态系统功能关系研究进展. 生态环境学报, 25, 1069-1075.]
- Liu MX, Zhang GJ, Li L, Mu RL, Xu L, Yu RX (2022). Relationship between functional diversity and ecosystem multifunctionality of alpine meadow along an altitude gradient in Gannan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33, 1291-1299. [刘旻霞, 张国娟, 李亮, 穆若兰, 徐璐, 于瑞新 (2022). 甘南高寒草甸海拔梯度上功能多样性与生态系统多功能的关系. 应用生态学报, 33, 1291-1299.]
- Liu MX, Zhao RD, Zhang C, Li R, Shao P (2017). Responses of physiological parameters in plants on sub-alpine meadow to slope aspects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 2863-2869. [刘旻霞, 赵瑞东, 张灿, 李瑞, 邵鹏 (2017). 亚高寒草甸植物叶片生理指标对坡向的响应. 应用生态学报, 28, 2863-2869.]
- Liu Y (2021). *Study on Variation in Ecosystem Multifunctionality Driven by Plant Diversity and Environmental Factors in Inner Mongolia Grassland*. Master degree dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. [刘阳 (2021). 内蒙古草原生态系统多功能性变化的生物多样性与环境驱动因素研究. 硕士学位论文文, 内蒙古大学, 呼和浩特.]
- Qin H, Zhang YB, Dong G, Zhang F (2019). Altitudinal patterns of taxonomic, phylogenetic and functional diversity of forest communities in Mount Guandi, Shanxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 762-773. [秦浩, 张殷波, 董刚, 张峰 (2019). 山西关帝山森林群落物种、谱系和功能多样性海拔格局. 植物生态学报, 43, 762-773.]
- Roscher C, Schumacher J, Gubsch M, Lipowsky A, Weigelt A, Buchmann N, Schmid B, Schulze ED (2012). Using plant functional traits to explain diversity-productivity relationships. *PLoS ONE*, 7, e36760. DOI: 10.1371/journal.pone.0036760.
- Sun L, Yue Y, Hu TX (2022). Research progress on the effects of disturbance on ecosystem multifunctionality. *Acta Ecologica Sinica*, 42, 6066-6075. [孙龙, 岳阳, 胡同欣 (2022). 干扰对生态系统多功能性的影响研究进展. 生态学报, 42, 6066-6075.]
- Wondimu MT, Nigussie ZA, Yusuf MM (2021). Tree species diversity predicts aboveground carbon storage through functional diversity and functional dominance in the dry evergreen Afromontane forest of Hararghe highland, Southeast Ethiopia. *Ecological Processes*, 10, 47. DOI: 10.1186/s13717-021-00322-4.
- Xiong DP, Zhao GS, Wu JS, Shi PL, Zhang XZ (2016). The relationship between species diversity and ecosystem multifunctionality in alpine grasslands on the Tibetan Changtang Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 3362-3371. [熊定鹏, 赵广帅, 武建双, 石培礼, 张宪洲 (2016). 羌塘高寒草地物种多样性与生态系统多功能关系格局. 生态学报, 36, 3362-3371.]
- Xu Y (2017). *Plant Community Functional Diversity of Tropical Rainforests in Xishuangbanna*. Master degree dissertation, Yunnan University, Kunming. [许戡 (2017). 西双版纳热带雨林植物功能多样性研究. 硕士学位论文文, 云南大学, 昆明.]
- Zhang ZH, Hou JH, He NP (2021). Predictability of functional diversity depends on the number of traits. *Journal of Resources and Ecology*, 12, 332-345.

责任编辑: 王德利 责任编辑: 乔鲜果