

DOI:10.11686/cyxb2024148

http://cyxb.magtech.com.cn

龚昕, 霍新茹, 李雯, 等. 宁夏罗山山地草原植被群落特征及其空间分异. 草业学报, 2025, 34(2): 1-15.

GONG Xin, HUO Xin-ru, LI Wen, et al. Vegetation community characteristics and spatial differentiation in mountain grassland in Luoshan, Ningxia. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 1-15.

## 宁夏罗山山地草原植被群落特征及其空间分异

龚昕<sup>1,3,4</sup>, 霍新茹<sup>1,3,4</sup>, 李雯<sup>1,3,4</sup>, 杨彦东<sup>1,3,4</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 秦伟春<sup>2</sup>, 沈艳<sup>1,3,4</sup>, 王国会<sup>1,3,4</sup>,  
马红彬<sup>1,3,4\*</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 罗山国家级自然保护区管理局, 宁夏 吴忠 751900; 3. 宁夏大学农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**宁夏罗山国家级自然保护区是宁夏中部干旱带上唯一的水源涵养林区和区域绿色生态保护屏障, 对该地区生物多样性保护、防治土壤侵蚀、维护生态安全具有重要作用, 但目前对罗山草地植物群落特征鲜有报道, 其草原植被群落特征及其与环境因子的关系还不清晰。本研究以罗山自然保护区草原为对象, 研究了不同海拔和不同类型草地植物群落组成、多样性特征的空间分异规律及植被群落特征与环境因子的关系。结果表明: 1) 罗山自然保护区草地植物群落由一、二年生草本、多年生草本和灌木、半灌木组成, 其中多年生草本占比最大; 荒漠草原与典型草原植物群落以禾本科和杂类草为主, 草甸草原以杂类草为主; 随着海拔的升高, 除群落地上生物量外, 所调查植被数量特征符合“中间高度膨胀”理论, 在海拔 1600~2100 m 时均达到峰值。2) 草地植物 Margalef 丰富度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数随着海拔的升高, 在 2000~2100 m 的草原样地达到最高, 呈现先增加后减小的“单峰型”变化趋势 ( $P < 0.05$ ); Simpson 优势度指数与 Pielou 均匀度指数随海拔升高变化不显著 ( $P > 0.05$ ); 保护区草甸草原、典型草原和荒漠草原 3 种草原类型间物种多样性差异不明显。3) 年降水量、海拔、土壤全氮含量、土壤全磷含量、日均气温是影响研究区草地植被特征的重要环境因子, 其中年降水量、海拔是主要环境因子, 土壤全氮含量、土壤全磷含量以及日均气温是次要环境因子。研究为进一步了解罗山自然保护区草地植被分布特征提供了基础。

**关键词:** 植被群落特征; 物种多样性; 海拔; 空间分异; 环境因子

## Vegetation community characteristics and spatial differentiation in mountain grassland in Luoshan, Ningxia

GONG Xin<sup>1,3,4</sup>, HUO Xin-ru<sup>1,3,4</sup>, LI Wen<sup>1,3,4</sup>, YANG Yan-dong<sup>1,3,4</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, QIN Wei-chun<sup>2</sup>, SHEN Yan<sup>1,3,4</sup>,  
WANG Guo-hui<sup>1,3,4</sup>, MA Hong-bin<sup>1,3,4\*</sup>

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Luoshan National Nature Reserve Administration, Wuzhong 751900, China; 3. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** The Ningxia Luoshan National Nature Reserve is the only water conservation forest area and regional green ecological protection barrier in the arid zone of central Ningxia. This reserve plays an important role in the protection of biodiversity, the prevention of soil erosion, and in ecological security. However, few studies have

收稿日期: 2024-04-29; 改回日期: 2024-07-01

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2021BEG02009), 罗山 2023 年中央财政林业改革发展资金草原生态修复治理补助项目, 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03043, 2023AAC05020)和宁夏重点研发计划(2023BEG02039)资助。

作者简介: 龚昕(2001-), 男, 宁夏银川人, 在读硕士。E-mail: 12023131544@stu.nxu.edu.cn

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ma\_hb@nxu.edu.cn

focused on the characteristics of the grassland plant community in Luoshan, or on the relationship between the characteristics of the grassland vegetation community and environmental factors. In this study, we analyzed the grassland plant community in the Luoshan Nature Reserve. We analyzed the composition of the plant community and its spatial differentiation, and the diversity characteristics of different types of grasslands and those at different altitudes. We also explored the relationship between the characteristics of the vegetation community and environmental factors. The results showed that: 1) The grassland plant community in Luoshan Nature Reserve was composed of annual and biennial herbs, perennial herbs, shrubs, and semi-shrubs, and perennial herbs accounted for the largest proportion of the community. The plant communities of desert steppe and typical grassland were dominated by grasses and weeds, while meadow steppe plant communities were dominated by weeds. As the altitude increased, except for the above-ground biomass of the community, the quantitative characteristics of the surveyed vegetation conformed to the ‘intermediate height expansion’ theory, and showed maximum values in the altitude range of 1600–2100 m. 2) As the altitude increased, the Margalef richness index and the Shannon–Wiener diversity index of grassland plants increased to a certain point, reaching the highest values in the grassland sample plots at 2000–2100 m. This trend was unimodal, with the initial increase followed by a decrease ( $P < 0.05$ ). Simpson’s dominance index and Pielou’s evenness index did not change significantly with increasing altitude ( $P > 0.05$ ). There was no significant difference in species diversity among the meadow steppe, the typical steppe, and the desert steppe. 3) Annual precipitation, altitude, total soil nitrogen content, total soil phosphorus content, and average daily air temperature were important environmental factors that affected grassland vegetation characteristics in the study area. Among the environmental factors, annual precipitation and altitude were the main environmental factors affecting grassland vegetation, whereas total soil nitrogen content, total soil phosphorus content, and average daily air temperature were secondary environmental factors. The results of this study provide a basis for a deeper understanding of the distribution characteristics of grassland vegetation in the Luoshan Nature Reserve.

**Key words:** vegetation community characteristics; species diversity; altitude; spatial differentiation law; environmental factor

草地生态系统是我国面积最大的陆地生态系统<sup>[1]</sup>,在生物多样性保护、应对全球气候变化以及全球、区域生态安全和可持续发展等领域中具有重要意义<sup>[2–3]</sup>。草地植物群落是植物与其生存环境共同作用的产物,是植被在生态系统中适应性的综合体现<sup>[4]</sup>。植物与环境间的相互作用会引起群落结构的演替和物种多样性的改变<sup>[5–7]</sup>。植物群落特征及其物种多样性是群落复杂程度的表现<sup>[8]</sup>,是反映群落特征的重要指标之一<sup>[9]</sup>。进行群落物种多样性研究不仅能更好地反映群落在组成、结构、功能等方面的差异,也可反映不同自然环境中群落的相互关系及其发展变化<sup>[10]</sup>。有研究发现,物种多样性和生物量沿海拔梯度变化呈现出复杂的空间分布格局。在祁连山区,随着海拔升高,Shannon–Wiener指数和Simpson指数的变化表明物种多样性先增加后减少,且在2701~2800 m海拔达到物种多样性的转折点<sup>[11]</sup>。藏北高寒草地的研究也显示,植物盖度和地上生物量随海拔升高呈线性降低趋势,物种丰富度和Shannon–Wiener指数沿海拔呈单峰分布格局<sup>[12]</sup>。天山南坡的研究结果与之相似,物种丰富度和Shannon–Wiener指数随海拔升高呈现明显的偏峰格局<sup>[13]</sup>。阿尔泰山不同草地类型群落的生物量、多样性指数差异明显,草地生物量与多样性存在非线性关系,物种多样性的垂直变化表现出一定的规律性<sup>[14]</sup>。在降水和温度等环境因子的作用下,不同海拔梯度植被群落特征也不尽相同。张媛媛<sup>[15]</sup>发现西天山区域尺度植物群落总物种、草本层和木本层的物种丰富度指数随海拔增加均呈单峰分布,物种 $\beta$ 多样性呈双峰分布。黄炎根等<sup>[16]</sup>在湖南张家界砂岩峰林的研究发现,灌木层与草本层的丰富度和多样性随着海拔的增加呈先增大后减小再增大的趋势。可见,植物群落结构和特征、物种多样性变化与其生长的环境息息相关<sup>[17]</sup>,草原植被群落特征随海拔及不同草地类型变化存在着一定的规律性。

宁夏罗山国家级自然保护区地处毛乌素沙漠的南缘,是屹立在毛乌素沙地南缘的“绿岛”<sup>[18-19]</sup>,也是宁夏中部干旱带上唯一的水源涵养林区和区域绿色生态保护屏障<sup>[20]</sup>,肩负着保护该区域生物多样性、防治土壤侵蚀、维护生态安全的重任<sup>[21-23]</sup>。罗山保护区地处温性荒漠草原区域,自山底到山顶依次分布有荒漠草原、典型草原和草甸草原<sup>[24-25]</sup>,深入了解罗山保护区草地植被群落特征对其草地资源、生物多样性等保护与恢复具有重要意义<sup>[26]</sup>。但是,目前有关罗山保护区森林植被研究较多,草地植被却鲜有报道<sup>[21-23]</sup>,其草地植被群落垂直分布特征、植被与环境因子的关系还不清晰,影响着保护区草地植物多样性的科学保护。因此,本研究通过对罗山不同海拔和草地类型植物群落结构特征、植物多样性分布格局及其影响因素的研究,有助于进一步了解宁夏罗山保护区乃至温带山地草地植物群落特征及其与环境的关系,为保护区草原生态系统保护提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

罗山国家自然保护区位于宁夏同心县和红寺堡行政区交界处(37°11′—37°25′ N,106°04′—106°25′ E),地处毛乌素沙漠南缘。保护区由大小罗山组成,南北长 36 km,东西宽 18 km,海拔 1502.6~2614.8 m。气候为中温带干旱大陆性气候,干燥少雨,且季节分配不均,降水以 7、8、9 月为主,年平均降水量 261.8 mm,年平均蒸发量 2467.3 mm,平均气温 8.8 °C,无霜期 130~150 d,平均日照时数 2881.5 h。植被由森林、草原、荒漠三大类型构成。草原植被主要分布在大小罗山低山和近山区域、小罗山中高山及山顶、大罗山中高山,其中荒漠草原主要分布在大小罗山低山和近山区域,典型草原主要分布在大小罗山中高山,草甸草原主要分布在大罗山山顶。地带性土壤由山地灰钙土、山地灰褐土组成。研究区草原分布及土壤性状见表 1。

### 1.2 样地设置

2022 年 7—8 月对研究区草地植被进行概查,2023 年 7—8 月依据前期概查的草原植被分布情况,根据双向指示种(two-way indicator species analysis, TWINSpan)结合中国草地分类法对草地类型进行划分<sup>[27]</sup>,并结合遥感影像图,在研究区内草地中共设置 50 个典型样地。样地内采用嵌套样方进行植物物种和群落结构数据采集,样地规格为 20 m×30 m,样地以草本植物为建群种时,沿对角线等距设置 3 个 1 m×1 m 草本样方;若样地以灌木或高大草本

表 1 保护区草原类型分布及土壤主要性状

Table 1 Grassland type distribution and main soil properties in the protected area

草原类型 Grassland type	分布区域 Distribution location	土壤有机质含量 Soil organic matter content (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全磷含量 Soil total phosphorus content (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤容重 Soil bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤黏粒含量 Soil clay content (%)
荒漠草原 Desert steppe	主要分布于大、小罗山东麓和同红公路两侧海拔 1500~1800 m。It is mainly distributed in the east foot of Daluo Mountain and Xiaoluo Mountain, and the altitude of 1500—1800 m on both sides of Tonghong Highway.	6.13	0.36	0.46	1.33	1.46
典型草原 Typical steppe	主要分布于海拔 1900 m 左右小罗山最南边和大罗山西侧及 1800~2000 m 大罗山主峰西边阳坡、半阳坡和山脚下。It is mainly distributed in the southernmost part of Xiaoluo Mountain and the west side of Daluo Mountain at an altitude of about 1900 m, and in the west side of the main peak of Daluo Mountain at an altitude of 1800—2000 m.	7.34	0.45	0.36	1.24	1.49
草甸草原 Meadow steppe	主要分布于好汉峰林下区域 2368~2558 m。It is mainly distributed in the under forest area of Haohan Peak at an altitude of 2368—2558 m.	21.86	0.85	0.74	1.11	3.56

(>80 cm)为建群种时,每个样地沿对角线等距设置3个5 m×5 m样方,在灌木样方内随机设置草本样方。设置样地尽可能覆盖不同海拔和生境,确保样方具有代表性。为方便探究不同海拔梯度草地植被特征,根据样地分布情况分为5个海拔梯度H<sub>1</sub>(1500~1600 m)、H<sub>2</sub>(1600~1800 m)、H<sub>3</sub>(1800~2000 m)、H<sub>4</sub>(2000~2100 m)、H<sub>5</sub>(>2100 m)。其中,研究区海拔1500~1600 m样地14个(13个荒漠草原样地,1个典型草原样地),1600~1800 m样地13个(9个荒漠草原样地,4个典型草原样地),1800~2000 m样地14个(8个荒漠草原样地,6个典型草原样地),2000~2100 m样地6个(1个荒漠草原样地,5个典型草原样地),大于2100 m样地3个(1个荒漠草原样地,2个草甸草原样地)。调查样地分布情况见图1。

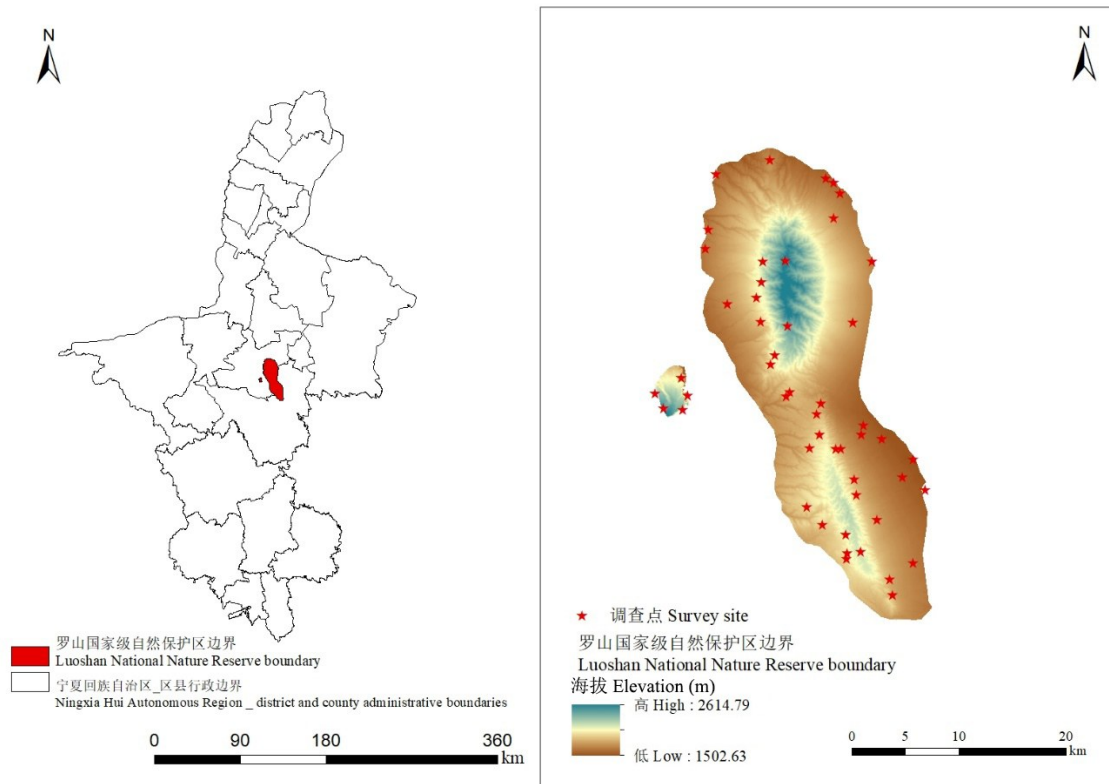


图1 样地基础信息

Fig. 1 Basic information of sample plots

基于宁夏回族自治区标准地图在线服务网站下载的审图号为宁S(2022)第001号的标准地图制作,底图无修改。Based on the standard map downloaded from the online service website of Ningxia Hui Autonomous Region with the map number of Ning S(2022) No.001, the standard map was created without any modifications to the base map.

### 1.3 调查取样及指标测定

使用手持GPS(Mobile Mapper 6,美国)对选择的样地记录每个样方的经纬度、海拔。盖度用针刺法测定,频度用样圆法测定,单位面积的植株数即为密度<sup>[28]</sup>;随机测定样方内灌木或草本10株(每块样地共30株)自然高度并求其平均值为每个物种的平均高度<sup>[28]</sup>;分种将样方内植物齐地刈割后带回实验室,于65℃烘箱烘至恒重测定地上生物量<sup>[29]</sup>。植被调查结束,在每个样地采用5点取样法用土钻采集0~40 cm土壤样品(10 cm为一层)。土壤样品带回实验室处理后,测定相关养分含量,其中土壤有机质、全氮、全磷含量分别采用重铬酸钾外加热法、全自动凯氏定氮仪(K-360,瑞士)、HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消煮-钼锑抗比色法测定<sup>[30]</sup>;土壤容重用环刀取原状土带回实验室于105℃烘箱内烘至恒重即为土壤容重<sup>[31]</sup>;土壤颗粒组成采用激光粒度仪(Microtrac 3500,英国)测定。相关土壤养分含量测定完毕后,综合4层土壤含量按样地分别求平均值用于后期数据分析。两年试验期间,在试验区内不同海拔放置RG3-M自记录式雨量筒(HO-BO UA-003-64 Pendant Temp/Event,美国),记录2022年4月末

—2023 年 9 月初不同海拔的日平均温度和年平均降水量。

#### 1.4 数据分析与处理

**1.4.1 物种重要值计算** 以重要值作为各个样地各种植物在草地群落中的优势度指标,物种重要值的计算公式为<sup>[32]</sup>:

$$IV = (Dr + Cr + Fr) / 3$$

式中:IV 表示重要值,Dr 表示相对密度,Cr 表示相对盖度,Fr 表示相对频度。

**1.4.2 物种多样性计算** 通过  $\alpha$  多样性指数对草地植物多样性进行测度<sup>[33]</sup>,以物种 Margalef 丰富度指数(S)、Shannon—Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)及 Pielou 均匀度指数(J)表示,计算公式如下:

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

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

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

$$J = H / \ln S$$

式中:S'为样方中的总物种数;N为样方中的总个体数; $P_i$ 为*i*种植物个体数占总个体数比例。

#### 1.5 数据分析

通过 Excel 2021 软件对数据进行初步整理计算及标准误差处理,并利用 SPSS 26.0 软件对植被特征及物种多样性进行单因素方差分析(one way ANOVA)。植物群落特征与环境因子间的冗余分析(redundancy analysis, RDA)排序采用 Canoco 5 软件进行, Pearson 相关分析及图形绘制借助 Origin 2024 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地植物群落特征

**2.1.1 不同草原类型植物群落组成和功能群的变化** 本次植被调查记录到罗山山地草原植物 108 种,隶属于 33 科 72 属。如表 2 所示,罗山山地草原(荒漠草原、典型草原、草甸草原)植物以草本—灌木为主,排名前 10 的物种重要值之和均占各草地类型 60% 以上(荒漠草原 63.83%,典型草原 64.19%,草甸草原 71.38%),其生活型多为多年生草本。如表 3 所示,荒漠草原与典型草原中禾本科植物为优势物种,重要值分别为 42.62%、45.44%,杂类草次之,重要值分别为 25.13%、27.44%;而草甸草原以杂类草植物为优势物种,重要值达 63.56%,豆科次之,重要值为 16.14%;物种数量上与重要值的比例不尽相同,3 种草原类型杂类草物种数均占比最大。生活型方面,3 种草地类型中多年生草本均占绝对优势,重要值分别为 76.80%(荒漠草原)、66.43%(典型草原)、96.97%(草甸草原),物种数量占比亦均为最大;荒漠草原与草甸草原一、二年生草本占比均最小,重要值分别为 4.98%、0.75%,典型草原灌木、半灌木占比最小,重要值为 11.75%。

**2.1.2 不同海拔梯度下草地植被群落特征** 如图 2 所示,随着海拔的升高,草原群落盖度与群落密度总体均呈现上升的趋势, $H_1$ 为群落盖度、群落密度的最小海拔范围,在 $H_1$ 时达到最大群落盖度、群落密度,而在海拔 $H_5$ ,群落盖度与群落密度随海拔的升高呈逐渐下降的趋势,各海拔下草原样地间群落盖度和群落密度差异显著( $P < 0.05$ );随着海拔的升高,群落地上生物量呈先下降后上升的趋势,以 $H_2$ 为最低, $H_5$ 为最高且与中低海拔差异显著( $P < 0.05$ );随着海拔升高,群落平均高度呈现先上升后下降再上升的趋势,在 $H_2$ 达到最高,但各海拔草原样地间群落平均高度差异并不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.2 植物物种多样性的空间分异

由图 3A 可知,随着海拔的升高, Margalef 丰富度指数呈现先增加后减小的趋势,在 $H_4$ 海拔的草原样地 Margalef 丰富度指数最高,除 $H_2$ 与 $H_3$ 样地无显著差异外( $P > 0.05$ ),各海拔样地间 Margalef 丰富度指数差异显著( $P < 0.05$ ); Shannon—Wiener 多样性指数随海拔的升高逐渐增大,在 $H_4$ 海拔处达到最大后开始呈现下降趋势; Simpson 优势度指数与 Pielou 均匀度指数均随着海拔升高呈逐渐增加的趋势,但各海拔样地间差异并不显著( $P > 0.05$ )。

表2 不同草原类型植物生活型和重要值

Table 2 Life style and importance value of species in different grassland types

草原类型 Grassland type	重要值排名前10的物种 The top ten species in terms of importance value		重要值 Importance value (%)
	生活型 Life style	物种名 Species name	
荒漠草原 Desert steppe	多年生草本 Perennial herb	短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	28.72
	多年生草本 Perennial herb	银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	5.40
	半灌木 Subshrub	蓍状亚菊 <i>Ajania achilleoides</i>	4.85
	多年生草本 Perennial herb	隐子草 <i>Cleistogenes serotina</i>	4.45
	多年生草本 Perennial herb	阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	4.31
	多年生草本 Perennial herb	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	4.11
	灌木 Shrub	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	3.49
	半灌木 Subshrub	牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	3.31
	多年生草本 Perennial herb	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	3.13
	半灌木 Subshrub	二裂委陵菜 <i>Sibbaldianthe bifurca</i>	2.06
典型草原 Typical steppe	多年生草本 Perennial herb	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	21.82
	多年生草本 Perennial herb	长芒草 <i>S. bungeana</i>	9.92
	多年生草本 Perennial herb	冷蒿 <i>A. frigida</i>	6.14
	多年生草本 Perennial herb	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	6.09
	多年生草本 Perennial herb	短翼岩黄芩 <i>Hedysarum brachypterum</i>	5.88
	多年生草本 Perennial herb	阿尔泰狗娃花 <i>A. altaicus</i>	3.95
	多年生草本 Perennial herb	草原石头花 <i>Gypsophila davurica</i>	3.55
	多年生草本 Perennial herb	星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	2.56
	多年生草本 Perennial herb	隐子草 <i>C. serotina</i>	2.22
	多年生草本 Perennial herb	针枝芸香 <i>Haplophyllum tragacanthoides</i>	2.06
草甸草原 Meadow steppe	多年生草本 Perennial herb	干生薹草 <i>Carex aridula</i>	25.92
	多年生草本 Perennial herb	冷蒿 <i>A. frigida</i>	8.95
	多年生草本 Perennial herb	黑柴胡 <i>Bupleurum smithii</i>	8.08
	多年生草本 Perennial herb	花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i>	7.13
	多年生草本 Perennial herb	串铃草 <i>Phlomis mongolica</i>	4.99
	多年生草本 Perennial herb	多序岩黄芩 <i>Hedysarum polybotrys</i>	4.29
	多年生草本 Perennial herb	双花堇菜 <i>Viola biflora</i>	3.21
	多年生草本 Perennial herb	洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	3.00
	多年生草本 Perennial herb	草原石头花 <i>G. davurica</i>	2.92
	多年生草本 Perennial herb	黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	2.89

为探究不同草原类型内物种多样性垂直变化,对不同海拔的荒漠草原、典型草原物种多样性指数进行分析。结果显示,荒漠草原(图3B)Margalef丰富度、Shannon—Wiener多样性以及Pielou均匀度指数均随着海拔的提升显著增大( $P < 0.05$ ),而Simpson优势度指数随着海拔升高其变化并不显著( $P > 0.05$ )。典型草原(图3C)Margalef丰富度指数随着海拔升高呈增大趋势( $P < 0.05$ );Shannon—Wiener多样性指数亦随着海拔的升高呈增大趋势,但在2000 m海拔下的增势并不显著( $P > 0.05$ ),而在2000 m海拔以上多样性指数呈显著增大趋势( $P < 0.05$ );Simpson优势度和Pielou均匀度指数随海拔变化并不显著。草甸草原由于海拔样本不足,并未进行详细分析。

表 3 不同草地类型植物功能群物种数和重要值的变化

Table 3 Changes of species number and importance value of plant functional groups in different grassland types

植物功能群 Plant functional group	荒漠草原 Desert steppe			典型草原 Typical steppe			草甸草原 Meadow steppe		
	物种数	物种比例	重要值	物种数	物种比例	重要值	物种数	物种比例	重要值
	Number of species	Species ratio (%)	Importance value (%)	Number of species	Species ratio (%)	Importance value (%)	Number of species	Species ratio (%)	Importance value (%)
灌木、半灌木 Shrub, subshrub	11	12.64	18.22	12	18.75	11.75	1	3.33	2.28
多年生草本 Perennial herb	64	73.56	76.80	51	79.69	66.43	27	90.00	96.97
一、二年生草本 Annual, biennial herb	12	13.80	4.98	1	1.56	21.82	2	6.67	0.75
禾本科 Poaceae	17	19.54	42.62	10	15.63	45.44	3	10.00	4.78
豆科 Leguminosae	20	22.99	13.19	11	17.19	10.55	4	13.33	16.14
菊科 Compositae	14	16.09	19.06	13	20.31	16.57	5	16.67	15.52
杂类草 Forb	36	41.38	25.13	30	46.88	27.44	18	60.00	63.56

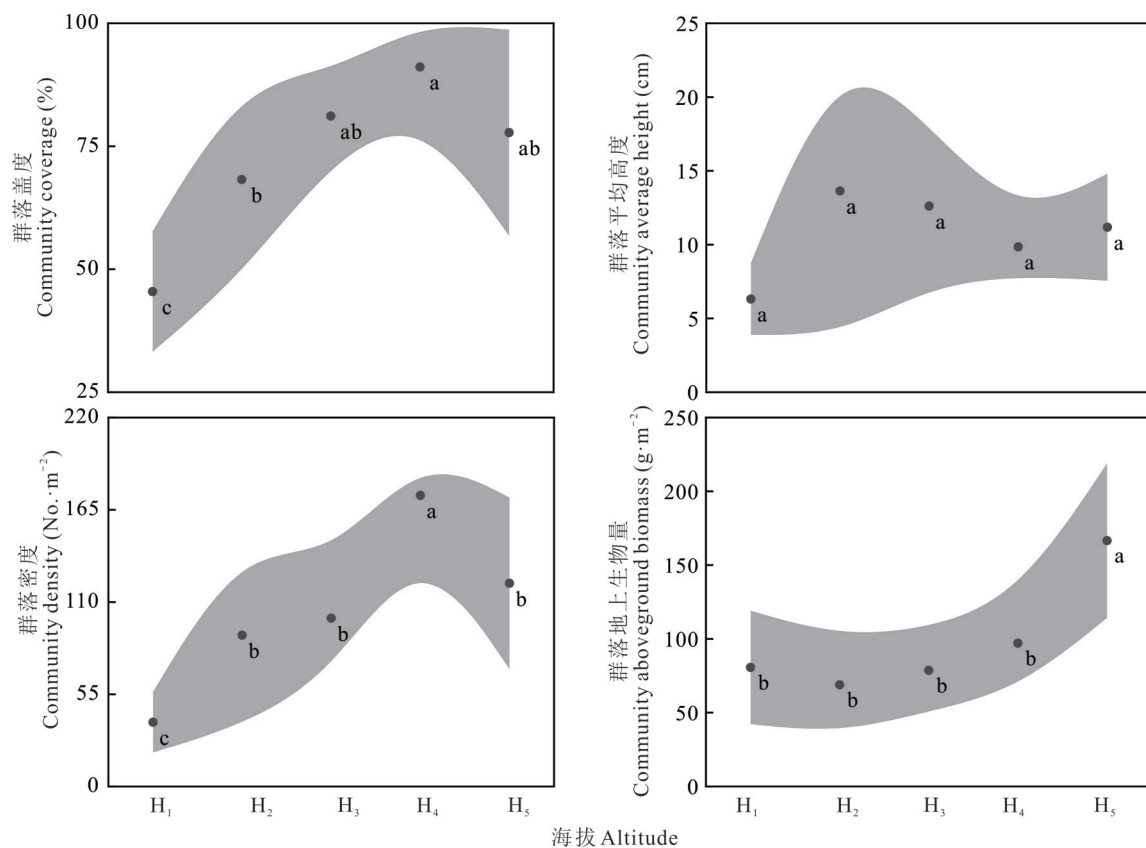


图 2 不同海拔植被特征变化

Fig. 2 Changes of vegetation characteristics at different altitudes

图中阴影部分表示不同海拔植被数量特征值的分布范围;不同小写字母表示不同海拔梯度间植被特征存在显著差异( $P < 0.05$ )。The shaded part in the figure represents the distribution range of vegetation quantity characteristic values at different altitudes. Different lowercase letters indicate significant differences in vegetation characteristics among different altitude gradients ( $P < 0.05$ ).

从不同草地类型来看(图 3D),Margarlef 丰富度、Simpson 优势度、Shannon—Wiener 多样性、Pielou 均匀度指数的排序均为:草甸草原 > 典型草原 > 荒漠草原,但 3 类草原类型间物种多样性指数的差异并不显著( $P > 0.05$ )。

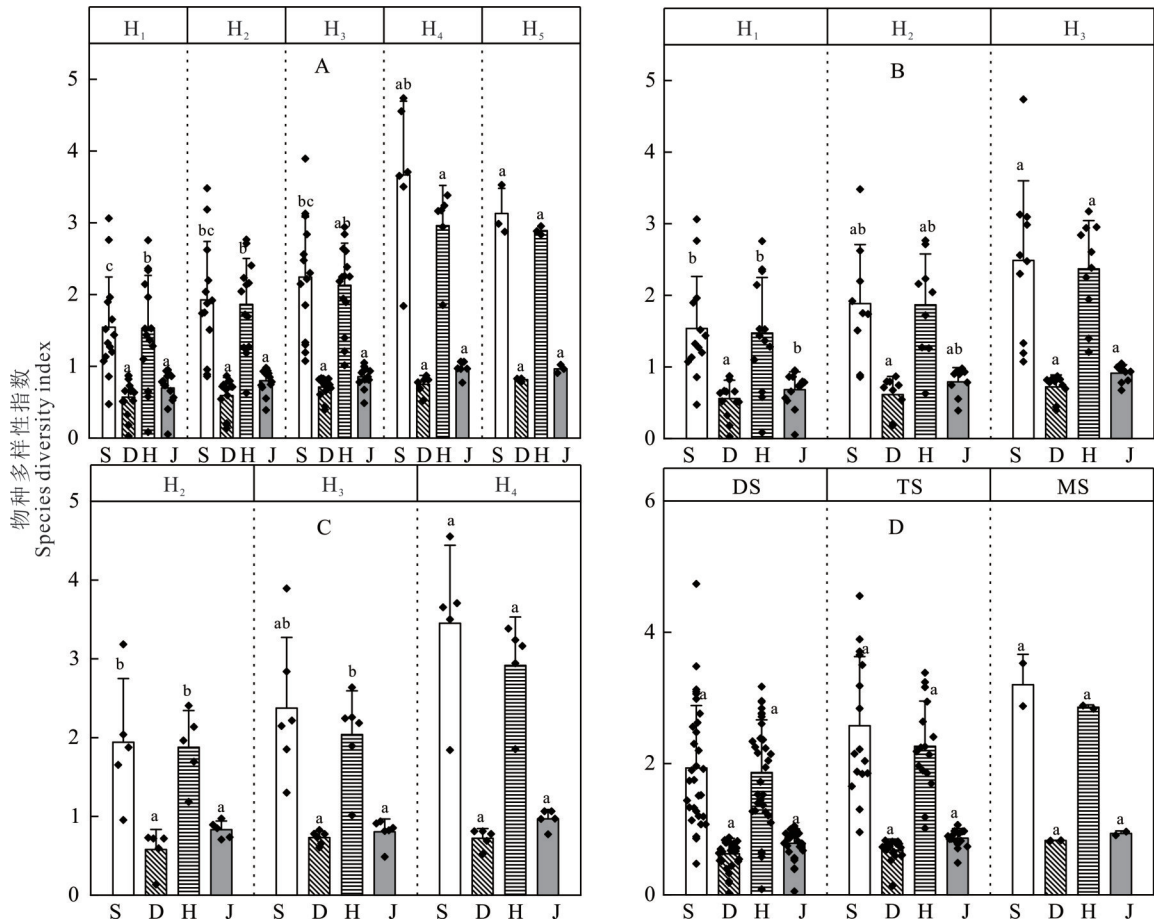


图3 不同海拔、草原类型物种多样性指数变化

Fig. 3 Species diversity index changes at different altitudes and grassland types

图内部大写字母表示: A:不同海拔; B:荒漠草原; C:典型草原; D:不同草地类型; DS:荒漠草原; TS:典型草原; MS:草甸草原。图中横轴大写字母表示: S:Margarlef丰富度指数; D:Simpson优势度指数; H:Shannon—Wiener多样性指数; J:Pielou均匀度指数。图中不同小写字母表示不同海拔或草地类型物种多样性指数差异显著( $P < 0.05$ )。The capital letters inside the figure indicate: A: Different altitude; B: Desert steppe; C: Typical steppe; D: Different grassland types; DS: Desert steppe; TS: Typical steppe; MS: Meadow steppe. The horizontal capital letters in the figure indicate: S: Margarlef richness index; D: Simpson dominance degree index; H: Shannon—Wiener diversity index; J: Pielou uniformity index. Different lowercase letters in the figure indicate that the species diversity index of different altitudes or grassland types is significantly different ( $P < 0.05$ ).

### 2.3 草地植物群落特征与环境因子的关系

植被群落特征以及物种的结构、组成与其所处的环境息息相关,因此,为探究植物群落特征及群落物种多样性与环境因子之间的关系,对罗山自然保护区草地植物群落的植被特征以及物种多样性指数与环境因子进行 Pearson 相关性分析,并利用 RDA 分析进行验证。其植被特征包括群落盖度、密度、高度、地上生物量,多样性指数包括 Margalef 丰富度、Simpson 优势度、Shannon—Wiener 多样性、Pielou 均匀度指数,环境因子包括海拔、年降水量、日均气温以及土壤性质(土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量,土壤容重,土壤黏粒含量)。

通过对研究区草原样地植物群落特征与环境因子进行 Pearson 相关性分析发现(图 4),除 Pielou 均匀度指数与海拔、土壤全氮含量、土壤全磷含量显著相关( $P < 0.05$ )外,其余 3 个物种多样性指数均与海拔、土壤全氮含量、土壤全磷含量呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),而 4 个多样性指数均与土壤黏粒含量存在正相关关系但并不显著( $P > 0.05$ ),其中土壤全磷含量与物种多样性指数间的相关性最大;年降水量、日均气温、土壤有机质含量及土壤容重与物种多样性指数间均呈现负相关关系,且土壤容重与物种多样性指数间负相关性显著( $P < 0.05$ ),年降水量、日均温与物种多样性指数间的相关性关系多数呈极显著( $P < 0.01$ ),但日均温与 Simpson 优势度指数显著相关( $P < 0.05$ ),而与 Pielou 均匀度指数有相关性但并不显著( $P > 0.05$ )。

植被特征中,群落盖度与海拔及土壤全磷含量间呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与土壤全氮含量呈显著相关关系( $P < 0.05$ ),而与年降水量、日均温、土壤容重间呈极显著的负相关关系( $P < 0.01$ );群落密度与海拔、土壤有机质、全氮、全磷、黏粒含量均呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),其中与土壤全氮、全磷以及黏粒含量的相关性较大,除此之外,与年降水量以及土壤容重之间也呈显著的负相关关系( $P < 0.05$ ),而与日均温呈极显著的负相关关系( $P < 0.01$ );群落平均高度同环境因子间有一定的相关关系但并不显著( $P > 0.05$ );地上生物量与海拔、土壤全氮含量、土壤全磷含量间的正相关性极为显著( $P < 0.01$ ),而与年降水量、日均温、土壤容重间存在极显著的负相关关系( $P < 0.01$ )。

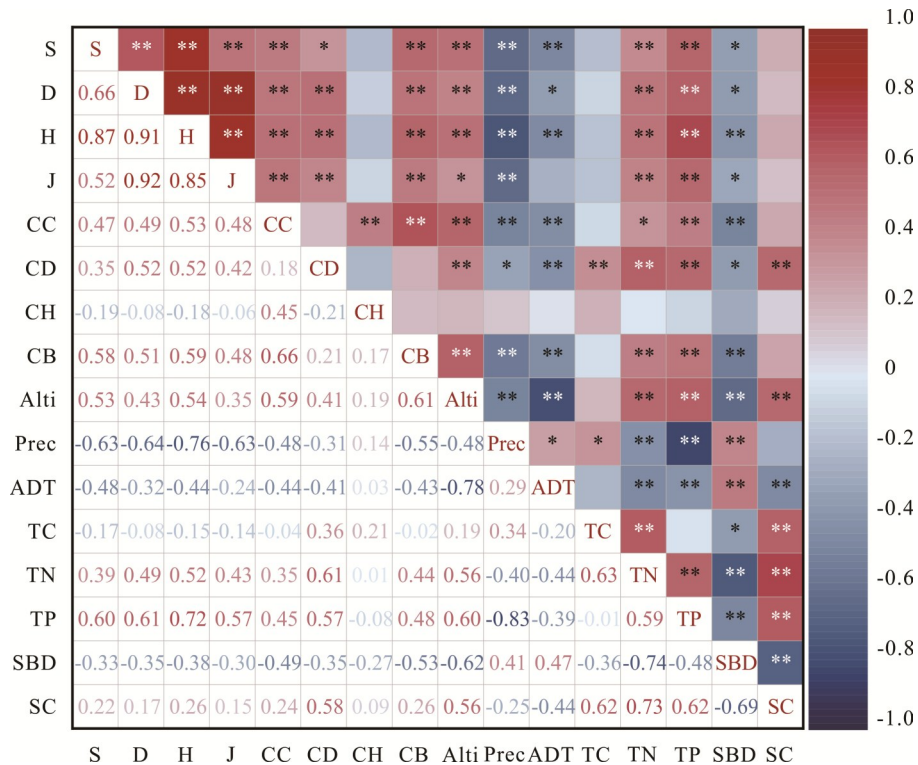


图 4 植被特征、物种多样性指数与环境因子的 Pearson 相关性分析

Fig. 4 Pearson correlation analysis of vegetation characteristics, species diversity index and environmental factors

\*表示在 0.05 水平相关性显著。\*\*表示在 0.01 水平相关性显著。CC: 群落盖度; CD: 群落密度; CH: 群落平均高度; CB: 群落地上生物量; S: Margalef 丰富度指数; D: Simpson 优势度指数; H: Shannon—Wiener 多样性指数; J: Pielou 均匀度指数; Alti: 海拔; Prec: 年降水量; ADT: 日均温; TC: 土壤有机质含量; TN: 土壤全氮含量; TP: 土壤全磷含量; SBD: 土壤容重; SC: 土壤黏粒含量。下同。\* indicates a significant correlation at the 0.05 level. \*\* indicates a significant correlation at the 0.01 level. CC: Community coverage; CD: Community density; CH: Community average height; CB: Community above-ground biomass; S: Margalef richness index; D: Simpson dominance degree index; H: Shannon—Wiener diversity index; J: Pielou uniformity index; Alti: Altitude; Prec: Annual precipitation; ADT: Average daily temperature; TC: Soil organic matter content; TN: Soil total nitrogen content; TP: Soil total phosphorus content; SBD: Soil bulk density; SC: Soil clay content. The same below.

冗余分析(RDA)显示(图 5),第一轴解释度为 41.22%,第二轴解释度为 9.17%,2 个排序轴累计解释植物群落特征与环境因子变化关系的 50.39%。根据图 5 箭头连线的长度与箭头连线间的夹角大小可以得知,群落盖度、群落密度、群落地上生物量 3 种数量特征以及丰富度、优势度、多样性、均匀度 4 个多样性指数与年降水量、日均温、土壤有机质以及土壤容重之间表现为负相关关系;对群落盖度、群落地上生物量影响较大的环境因子是海拔,对群落密度影响较大的环境因子为土壤全氮含量和土壤全磷含量,对群落平均高度影响最大的环境因子是年降水量;土壤全氮、全磷含量对物种多样性指数的影响较大,特别是 Pielou 均匀度指数和 Shannon—Wiener 多样性指数。同时冗余分析结果显示,有 6 个显著影响植物群落特征的环境因子( $P < 0.05$ ),分别是年降水量、海拔、土壤全磷含量、日均温、土壤全氮含量和土壤黏粒含量;2 个极显著影响植物群落特征的环境因子( $P < 0.01$ ):年

降水量和海拔。

综合冗余分析(RDA)以及Pearson相关性分析,结果表明,海拔、年降水量、日均温以及土壤全氮、全磷含量与植被群落特征间大多数极显著相关且相关性较高;海拔与土壤全氮、全磷含量极显著正相关( $P < 0.01$ ),与日均气温呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ );年降水量与土壤全磷含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ )。由此不难得出随着海拔升高日均温降低、土壤全磷含量增加、年降水量减少,植被群落特征及物种多样性均有明显增长趋势,影响罗山地区的草原植被生长和分布的主要环境因子是年降水量和海拔,次要环境因子是土壤全氮、全磷含量以及日均气温。

### 3 讨论

#### 3.1 草地植物群落组成和功能群的变化特征

群落组成与生长特征的变化体现了植被对不同生境的气候、地形和土壤等条件的适应情况<sup>[34-36]</sup>,特别是在山地等环境条件变化很大的地区,植物与环境的作用更加强烈,二者间通过相互影响、相互作用,使得山地地区植被群落特征趋于多样化和复杂化<sup>[37]</sup>。本研究表明,荒漠草原样地短花针茅为绝对优势物种,典型草原样地大针茅为绝对优势物种,草甸草原干生藁草为绝对优势物种;其中草甸草原群落结构相对简单,为藁草植物生长繁殖提供了良好的环境条件<sup>[38]</sup>。而生活型方面,罗山山地草原以多年生草本,一、二年生草本,灌木、半灌木3种生活型组成,其中3种草地类型均以多年生草本占绝对优势,物种数量占比也均为最高,反映了本地区的草原化特征同时也符合研究区干旱气候特征<sup>[39-40]</sup>。植物经济类群对草地植物群落生产力、稳定性和退化恢复具有重要的影响,对于经济类群来说,本研究发现,荒漠草原与典型草原植物群落以禾本科和杂类草为主,这一结果与陈大岭<sup>[41]</sup>在阴山北麓不同草原区的研究结果相似;草甸草原以杂类草为主要经济类群,这与王利锋等<sup>[42]</sup>在内蒙古草甸草原的研究结果相似。

海拔作为重要的地形因素,能够通过改变环境因子(气温、年降水量、年积温等)进而影响植被群落特征<sup>[43]</sup>。李强等<sup>[44]</sup>对东祁连山高寒草甸植被特征的研究发现,随着海拔升高,植被盖度、草层高度、地上生物量均呈先升高后降低的趋势;金章利等<sup>[45]</sup>对山地草甸研究发现,不同海拔草地植被总盖度、草层高度、地上生物量均呈现中海拔>低海拔>高海拔。本研究发现随着海拔的升高,草原群落盖度与群落密度总体均呈现上升的趋势,但在海拔2000~2100 m达到最大群落盖度、群落密度后,群落盖度与群落密度随着海拔的升高均呈逐渐下降的趋势;群落地上生物量随海拔上升以1600~1800 m海拔为最低,大于2100 m海拔达到最高,呈先下降后上升的趋势;群落平均高度随海拔上升呈现先上升后下降再上升的趋势,在1600~1800 m达到最高群落平均高度。对不同草地类型而言,研究区3种草地类型主要分布区亦以海拔为主要因素,海拔依次为草甸草原>典型草原>荒漠草原,不同草地类型群落盖度、密度、平均高度、地上生物量变化与海拔呈正相关,即草甸草原>典型草原>荒漠草原。综上,本研究部分结果符合“中间高度膨胀”理论,即群落盖度、群落密度在海拔1800~2100 m时达到峰值,群落平均高度在1600~1800 m时达到峰值,而海拔2100 m以上由于高海拔区域气温较低,限制了植物的生存,植被群落特征再次降低<sup>[46]</sup>。

#### 3.2 植物物种多样性空间分异特征

物种多样性能够反映植物群落中物种的丰富度和均衡程度,物种多样性在不同海拔条件下的分布格局受气温、降水等多种环境因子的共同影响<sup>[47]</sup>。本研究发现,研究区Margarlef丰富度指数与Shannon-Wiener多样性指数均随着海拔的升高在2000~2100 m的草原样地达到最高,呈现先增加后减小的“单峰型”变化趋势,这与贾文

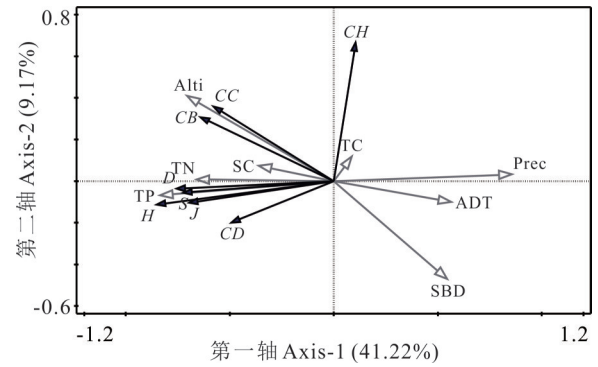


图5 植被特征、物种多样性指数与环境因子的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of vegetation characteristics, species diversity index and environmental factors

雄等<sup>[43]</sup>在祁连山北坡植物群落特征研究中的结果相一致。低山地区由于受到水分限制,高海拔地段受热量限制,而中海拔地区(1800~2100 m)处于不同草原类型的过渡地带,阳光充足、降水相对丰沛、气温适宜,群落多样性指数和均匀度指数因此达到峰值<sup>[48]</sup>。Simpson优势度指数与Pielou均匀度指数虽然均随着海拔升高呈逐渐增加的趋势,但各海拔草原样地间差异并不显著( $P>0.05$ ),说明了植物群落均匀度受环境影响较小,而主要受自身结构类型和稳定程度的影响<sup>[49]</sup>。

本研究还发现,研究区从不同草地类型来看,3类草原类型多样性指数均呈现草甸草原>典型草原>荒漠草原,草原类型间物种多样性指数的差异不显著( $P>0.05$ )。而荒漠草原的Margalef丰富度、Shannon—Wiener多样性以及Pielou均匀度指数均随着海拔的提升显著增大( $P<0.05$ ),Simpson优势度指数随着海拔升高其变化并不显著( $P>0.05$ );典型草原的Margalef丰富度指数随着海拔升高呈增大趋势,各海拔草原样地间的差异显著( $P<0.05$ );Shannon—Wiener多样性指数亦随着海拔的升高呈增大趋势,但在2000 m海拔下的增势并不显著( $P>0.05$ ),而在2000 m海拔后多样性指数呈显著增大趋势( $P<0.05$ );Simpson优势度和Pielou均匀度指数随海拔变化并不显著。综上所述,不同海拔、不同草原类型物种多样性的空间差异,可能体现了不同草原群落对区域宏观气候的直接响应和对环境的生态适应性机制<sup>[50]</sup>。

### 3.3 影响草地植被特征的主要环境因子

植被与环境是一个不可分割的整体,群落分布主要受气候、土壤养分、水文条件与人类活动等因素的共同影响。在不同生境中,环境因子对群落分布的影响程度大不相同,何雅琴等<sup>[51]</sup>研究发现4种土壤理化性质(全磷含量、全钾含量、碱解氮、pH值)是影响研究区植被多样性的主要环境因子;李婷婷等<sup>[52]</sup>研究发现,温度和降水是影响东北阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林群落物种多样性的主要环境因子。本研究结果表明,年降水量、海拔、日均温、土壤全氮含量、土壤全磷含量是影响研究区植被特征的重要环境因子,其中年降水量和海拔的影响较大。在研究山地植物分布格局时,海拔梯度通常被看作是主导因子,而本研究发现年降水量与海拔梯度间也存在极显著的相关性,但由于所研究区域的海拔差异较小,其作用已被弱化至次要地位<sup>[53]</sup>。在小尺度变化中,海拔的差异包括了多种环境因素的综合变化过程,不同海拔区域引起降水量的差异,导致土壤中的有效水分含量差异,造成土壤干化及植物根系养分吸收利用效率下降,进而导致群落中植物种类和比例的差异化<sup>[54]</sup>。在低海拔地区,气温高、蒸发量大,土壤含水量低,因此分布群落多为耐旱植物的荒漠草原;在高海拔地区,随着海拔升高,温度降低,水分条件转好,灌木比例减少,植被发展为藁草草甸。除此之外,在降水量较大的区域,由于土壤中的水分含量高,因此土壤中的水分状况并不会对植物的生长、发育形成制约,但是在某些较为干旱的区域,土壤中的水分状况就很有可能会对植物的群落结构及空间分布产生影响,因此,在水资源极度缺乏的干旱区,土壤养分是决定群落结构与空间格局的重要因子<sup>[55]</sup>。

## 4 结论

本研究通过对地处温性荒漠草原区域的宁夏罗山国家级自然保护区草地植物群落特征研究发现,保护区草地植被主要由一、二年生草本、多年生草本和灌木、半灌木组成,其中多年生草本占比最大。随海拔的升高,除群落地上生物量外,草地植被数量变化特征符合“中间高度膨胀”理论,即在海拔1600~2100 m的中高山区域达到峰值,Margalef丰富度指数、Shannon—Wiener多样性指数呈先增加后减小的“单峰型”变化,在海拔2000~2100 m最高,而Simpson优势度指数与Pielou均匀度指数虽呈逐渐增加趋势但差异不显著( $P>0.05$ )。年降水量、海拔、土壤全氮含量、土壤全磷含量以及日均气温影响着研究区草原植被特征变化,其中,年降水量和海拔被确定为重要环境因子,而土壤全氮含量、土壤全磷含量以及日均温被归纳为次要环境因子。研究为了解宁夏罗山国家级自然保护区的草地植被群落结构、多样性变化及其与环境因子的关系提供了基础。

## 参考文献 References:

- [1] The 3<sup>rd</sup> National Land Survey Leading Group of the State Council, Ministry of Natural Resources, National Bureau of Statistics. A bulletin on the main data results of the third national land survey. Beijing: People's Daily, 2021.

- 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室, 自然资源部, 国家统计局. 第三次全国国土调查主要数据公报. 北京: 人民日报, 2021.
- [2] Yi M X, Sun Z G, Cong P F, *et al.* Research progress on the response of grassland ecosystem function to climate change. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(12): 112–120.  
羿明璇, 孙政国, 丛鹏飞, 等. 草地生态系统功能对气候变化的响应研究进展. *中国草地学报*, 2023, 45(12): 112–120.
- [3] Chen G S, Tian H Q. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 189–204.  
陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 189–204.
- [4] Liu B, Sun Y L, Wang Z L, *et al.* Analysis of the vegetation cover change and the relative role of its influencing factors in north China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 12–23.  
刘斌, 孙艳玲, 王中良, 等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 12–23.
- [5] Bai X H, Zhang J T, Cao K, *et al.* Relationship between forest communities and the environment in the Xiaowutai Mountain National Nature Reserve, Hebei. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3683–3696.  
白晓航, 张金屯, 曹科, 等. 河北小五台山国家级自然保护区森林群落与环境的关系. *生态学报*, 2017, 37(11): 3683–3696.
- [6] Yang G G, Hao H X, Yue Y P, *et al.* Community characteristics, distribution and environment interpretation of *Cupressus gigantea* along Yarlung Zangbo River in Tibet. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2023, 59(1): 156–162.  
杨刚刚, 郝海霞, 岳艳鹏, 等. 雅鲁藏布江巨柏分布区植物群落特点、分布与环境解释. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(1): 156–162.
- [7] Zheng D S, Liu Q J. Effects of environmental factors on forest community distribution in Changbai Mountain Nature Reserve of northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(8): 57–64.  
郑东升, 刘琪璟. 环境因子对长白山自然保护区森林群落分布的影响. *北京林业大学学报*, 2023, 45(8): 57–64.
- [8] Huston M A. Hidden treatments in ecological experiments; re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 1997, 110(4): 449–460.
- [9] Nguyen H, Herbohn J, Firm J, *et al.* Biodiversity—productivity relationships in small-scale mixed-species plantations using native species in Leyte Province, Philippines. *Forest Ecology & Management*, 2012, 274(15): 81–90.
- [10] Carnicer J, Sardans J, Stefanescu C, *et al.* Global biodiversity, stoichiometry and ecosystem function responses to human-induced C–N–P imbalances. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 172(1): 82–91.
- [11] Chang X X, Zhao W Z, Zhao A F. Species diversity of pasture community at different altitude levels in Qilian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1599–1603.  
常学向, 赵文智, 赵爱芬. 祁连山区不同海拔草地群落的物种多样性. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1599–1603.
- [12] Wu H B, Shui H W, Hu G Z, *et al.* Species diversity and biomass distribution patterns of alpine grassland along an elevation gradient in the northern Tibetan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(6): 1071–1079.  
吴红宝, 水宏伟, 胡国铮, 等. 海拔对藏北高寒草地物种多样性和生物量的影响. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1071–1079.
- [13] Hu Y K, Li K H, Adeli M D, *et al.* Plant species diversity of alpine grasslands on southern slope of Tianshan mountain along altitude gradient. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 182–186.  
胡玉昆, 李凯辉, 阿德力·麦地, 等. 天山南坡高寒草地海拔梯度上的植物多样性变化格局. *生态学杂志*, 2007, 26(2): 182–186.
- [14] Zhang K L, Ye M, Yin X K, *et al.* Species composition and diversity of grassland community in Habahe forest zone of Altai Mountains. *Grassland and Turf*, 2023, 43(5): 75–83.  
张凯丽, 叶茂, 殷锡凯, 等. 阿尔泰山哈巴河林区草地群落物种组成及多样性研究. *草原与草坪*, 2023, 43(5): 75–83.
- [15] Zhang Y Y. Variation characteristics of plant community diversity along the elevational gradient in the western Tianshan Mountains. Anqing: Anqing Normal University, 2023.  
张媛媛. 西天山植物群落多样性沿海拔梯度的变化特征. 安庆: 安庆师范大学, 2023.
- [16] Huang Y G, Li L, Dai X A. Understory plant diversity of Zhangjiajie sandstone peak forest at different elevations and its relationship with soil factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(10): 2469–2476.  
黄炎根, 李丽, 戴兴安. 张家界砂岩峰林不同海拔林下植物多样性及其与土壤因子的关系. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2469–2476.

- [17] Zhao X Y, An S Z, Cao G M, *et al.* Surveying desert major plant communities in China: implications, current status, and scheme. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(1): 9–19.  
赵学勇, 安沙舟, 曹广民, 等. 中国荒漠主要植物群落调查的意义、现状及方案. *中国沙漠*, 2023, 43(1): 9–19.
- [18] Wang X B, Ma C, Chen D K, *et al.* Spatiotemporal change of NPP and its response to climate over Luoshan region in Ningxia Hui Autonomous Region from 2004 to 2015. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(6): 358–364, 385.  
王夏冰, 马超, 陈登魁, 等. 宁夏罗山地区2004–2015年NPP时空变化及气候响应. *水土保持通报*, 2018, 38(6): 358–364, 385.
- [19] Su J S, Cheng J M, Gao Y, *et al.* Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 626–632.  
苏纪帅, 程积民, 高阳, 等. 宁夏大罗山4种主要植被类型的细根生物量. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 626–632.
- [20] Yang X X, Zhang Z Q. Countermeasures and measures to speed up the construction of Luoshan natural ecological barrier in the central arid zone of Ningxia. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(21): 85, 116.  
杨雪霞, 张占强. 加快建设宁夏中部干旱带罗山天然生态屏障的对策与措施. *安徽农学通报*, 2008, 14(21): 85, 116.
- [21] Yang J L, Zhang X L, Cao B, *et al.* Active organic carbon in soil of typical vegetation in Luoshan of Ningxia. *Journal of West China Forestry Science*, 2017, 46(4): 61–66.  
杨君珑, 张学丽, 曹兵, 等. 宁夏罗山典型植被类型的土壤活性有机碳组分研究. *西部林业科学*, 2017, 46(4): 61–66.
- [22] Tian H G, Qin W C, Shi X H. Suggestions on the protection and utilization of forest resources in Luoshan Reserve. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(9): 16, 188.  
田会刚, 秦伟春, 施兴慧. 罗山保护区森林资源保护及利用建议. *安徽农学通报*, 2009, 15(9): 16, 188.
- [23] Zhou J, Yang H. Protection status, existing problems and countermeasures of plant resources in Luoshan, Ningxia. *Regional Governance*, 2019(32): 55–57.  
周静, 杨慧. 宁夏罗山植物资源的保护现状、存在的问题及对策. *区域治理*, 2019(32): 55–57.
- [24] Ren C B, Wu J, Shi S W. Structural analysis and optimization countermeasures of forest land of Luoshan National Nature Reserve. *Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2012, 53(8): 56, 64.  
任成宝, 吴娟, 石少伟. 宁夏罗山国家级自然保护区林地结构现状及优化对策. *宁夏农林科技*, 2012, 53(8): 56, 64.
- [25] Wu X, Cheng X X, Ma Y K, *et al.* Chemical characteristics of groundwater Luoshan Nature Reserve. *Ground Water*, 2012, 34(1): 23–26, 79.  
吴玺, 程旭学, 马岳昆, 等. 罗山自然保护区地下水化学特征研究. *地下水*, 2012, 34(1): 23–26, 79.
- [26] Wang Y J, Ma Y Z, Zheng Y H, *et al.* Response of tree-ring width of *Pinus tabulaeformis* to climate factors in Luoshan Mountains of Ningxia. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5): 971–976.  
王亚军, 马玉贞, 郑影华, 等. 宁夏罗山油松(*Pinus tabulaeformis*)树轮宽度对气候因子的响应分析. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 971–976.
- [27] Jia X Y, Ma H B, Zhou Y, *et al.* Floristic quantitative classification and successional characteristics of typical grassland under different ecological restoration methods in the Loess Hilly Region of Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(2): 15–25.  
贾希洋, 马红彬, 周瑶, 等. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落数量分类和演替. *草业学报*, 2018, 27(2): 15–25.
- [28] Jia X Y, Ma H B, Zhou Y, *et al.* Effect of different ecological restoration measures on the characteristics of typical grassland communities in loess hilly region of Ningxia. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(1): 51–60.  
贾希洋, 马红彬, 周瑶, 等. 不同生态恢复措施对宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落特征的影响. *中国草地学报*, 2019, 41(1): 51–60.
- [29] Cai Y R, Lu Q, Wu W P, *et al.* Effects of fish-scale pit ecological restoration measures on plant community characteristics in a typical steppe in Ningxia. *Pratacultural Science*, 2018, 35(9): 2115–2126.  
蔡育蓉, 陆琪, 吴宛萍, 等. 鱼鳞坑生态恢复措施对宁夏典型草原植物群落特征的影响. *草业科学*, 2018, 35(9): 2115–2126.
- [30] Qin L. *Statistical ecology*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009.  
覃林. *统计生态学*. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [31] Yang Y D, Ma J L, Ma H B, *et al.* Effects of grazing exclusion on root trait characteristics of dominant plants in the desert steppe. *Pratacultural Science*, 2023, 40(6): 1507–1517.  
杨彦东, 马静利, 马红彬, 等. 封育对荒漠草原优势植物根系性状特征的影响. *草业科学*, 2023, 40(6): 1507–1517.

- [32] Zhang X L, Zhou J H, Cai W T, *et al.* Diversity characteristics of plant communities in the arid desert of the Heihe basin under different moisture gradients. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14): 4627–4635.  
张晓龙, 周继华, 蔡文涛, 等. 水分梯度下黑河流域荒漠植物群落多样性特征. *生态学报*, 2017, 37(14): 4627–4635.
- [33] Magurran A E. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [34] Jia W X, Liu Y R, Zhang Y S, *et al.* Species diversity and biomass of meadow steppe in Qilian Mountains and their relationships with climate factors. *Arid Zone Research*, 2015, 32(6): 1167–1172.  
贾文雄, 刘亚荣, 张禹舜, 等. 祁连山草甸草原物种多样性和生物量与气候要素的关系. *干旱区研究*, 2015, 32(6): 1167–1172.
- [35] Niu Y J, Zhou J W, Yang S W, *et al.* Quantitative apportionment of slope aspect and altitude to soil moisture and temperature and plant distribution on alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1489–1497.  
牛钰杰, 周建伟, 杨思维, 等. 坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1489–1497.
- [36] Zhang Q D, Wei W, Chen L D, *et al.* Spatial variation of soil moisture and species diversity patterns along a precipitation gradient in the grasslands of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1351–1362.  
张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1351–1362.
- [37] Dong Y L, Zhang D G, Chen J G, *et al.* Comparison of community structure and biodiversity of alpine meadow at different habitats in Eastern Qilian Mountains: A case study in Zhuaxixiulong township of Tianzhu county, Gansu province. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3): 481–487.  
董云龙, 张德罡, 陈建纲, 等. 东祁连山高寒草地不同生境条件下植物群落结构特征及多样性比较——以甘肃省天祝抓喜秀龙乡为例. *草地学报*, 2014, 22(3): 481–487.
- [38] Chen G L. *Study on community structure and plant diversity of shrubby grass of Luoshan in Ningxia*. Yinchuan: Ningxia University, 2023.  
陈改莲. *宁夏罗山灌草群落结构及植物多样性研究*. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [39] He M Z. Composition and distribution of desert vegetation in Alxa plateau and its environmental interpretation: III. Response of plant functional group diversity to environmental factors. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 278–286.  
何明珠. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释: III. 植物功能群多样性对环境因素的响应. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 278–286.
- [40] He M Z, Zhang Z S, Li X J, *et al.* Environmental effects on distribution and composition of desert vegetations in Alxa plateau: II. Correlation between  $C_4$  plants distribution and environmental factors. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(1): 57–62.  
何明珠, 张志山, 李小军, 等. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释: II.  $C_4$ 植物组成、分布特征与环境的关系. *中国沙漠*, 2010, 30(1): 57–62.
- [41] Chen D L. *Processes and mechanisms of abandoned croplands recovery succession across different steppe in the northern Yinshan Mountain*. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.  
陈大岭. *阴山北麓不同草原区弃耕地恢复演替过程及其机理研究*. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [42] Wang L F, Wu X Y, Chang J C, *et al.* Effects of seasonal grazing rest on spatial distribution pattern of plant communities in meadow steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(8): 1944–1953.  
王利锋, 吴秀扬, 常杰超, 等. 季节性休牧对草甸草原植物群落空间分布格局的影响. *草地学报*, 2022, 30(8): 1944–1953.
- [43] Jia W X, Chen J H, Zhang Y S, *et al.* The relationship of characteristics of meadow communities with soil moisture and temperature in the northern slope of Qilian Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 661–667.  
贾文雄, 陈京华, 张禹舜, 等. 祁连山北坡草地植物群落特征与土壤水热因子的关系. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 661–667.
- [44] Li Q, He G X, Liu Z G, *et al.* Responses of vegetation characteristics and biodiversity to habitat in alpine meadows in eastern Qilian Mountains. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 169–177.  
李强, 何国兴, 刘志刚, 等. 东祁连山高寒草甸植被特征和生物多样性对生境的响应. *草地学报*, 2022, 30(1): 169–177.
- [45] Jin Z L, Liu G P, Zhou M T, *et al.* Elevation characteristics of grassland community diversity and effect of soil physical and chemical properties in Karst Mountain grassland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 661–668.  
金章利, 刘高鹏, 周明涛, 等. 喀斯特山地草地群落多样性海拔特征及土壤理化性质特征. *生态环境学报*, 2019, 28(4):

661—668.

- [46] Wang X R, Xing Y J. Research progress on the effects of environmental factors and community dynamics on plant species diversity. *International Journal of Ecology*, 2021, 10(4): 608—617.  
王心茹, 邢亚娟. 环境因子及群落动态对植物物种多样性影响研究进展. *世界生态学*, 2021, 10(4): 608—617.
- [47] Kitayama K. An altitudinal transect study of the vegetation on Mount Kinabalu, Borneo. *Vegetation*, 1992, 102(2): 149—171.
- [48] Yu S J, Wang J, He H Y, *et al.* Driving factors of the temporal stability of biomass of mixed broadleaf-conifer forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(11): 181—190.  
于水今, 王娟, 何海燕, 等. 针阔混交林生物量稳定性驱动因子. *林业科学*, 2022, 58(11): 181—190.
- [49] Li G X, Su J D, Zhao X J. Response relationship between plant community diversity and altitude in Qilian Mountain National Nature Reserve, Gansu Province. *Natural Protected Areas*, 2024, 4(1): 110—122.  
李国霞, 苏军德, 赵晓罔. 甘肃祁连山自然保护区植物群落多样性与海拔的响应关系. *自然保护地*, 2024, 4(1): 110—122.
- [50] Liu Y J. Characteristics and influencing factors of the phylogenetic structure of herbaceous plant communities in the middle—eastern Qilian Mountains. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.  
刘永靖. 祁连山中东部草本植物群落谱系结构特征及其影响因素. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [51] He Y Q, Zeng J Y, Chen G J, *et al.* Characteristics and species diversity of typical forest community in Dalian island of Pingtan, Fujian, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2022, 28(3): 759—769.  
何雅琴, 曾纪毅, 陈国杰, 等. 福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(3): 759—769.
- [52] Li T T, Ji L Z, Yu D P, *et al.* Forest community classification, ordination, and comparison of species diversity in broadleaved-Korean pine mixed forests of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 620—628.  
李婷婷, 姬兰柱, 于大炮, 等. 东北阔叶红松林群落分类、排序及物种多样性比较. *生态学报*, 2019, 39(2): 620—628.
- [53] Xu J X, Wang J Z. Correlation between vegetation community and soil physical-chemical factors in water-level fluctuation zone of Xiangxi River of the Three Gorges Reservoir area. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12): 3661—3669.  
徐建霞, 王建柱. 三峡库区香溪河消落带植被群落特征与土壤环境相关性. *生态学杂志*, 2018, 37(12): 3661—3669.
- [54] Hu Y X, Huang J L, Du Y, *et al.* Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 274—285.
- [55] Yue P P, Lu X F, Ye R R, *et al.* Quantitative classification and ordination of *Stipa purpurea* steppe community in source region of the Yangtze River. *Guihaia*, 2014, 34(5): 635—641.  
岳鹏鹏, 卢学峰, 叶润蓉, 等. 长江源区紫花针茅草原群落数量分类与排序. *广西植物*, 2014, 34(5): 635—641.