

甘肃中东部地区 9 种藁草属植物分布区 群落特征和土壤养分状况

康瑞卿, 白小明*, 冉福, 李萍, 杨小妮, 陈浪浪

(甘肃农业大学 草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070)

摘要: 为探究藁草属 (*Carex* L.) 植物在不同植被类型中的分布状况, 该研究对甘肃中东部地区 9 种藁草属 (*Carex* L.) 植物分布区的群落特征进行调查, 并对土壤养分状况进行比较分析, 以揭示野生藁草群落物种多样性和分布特征与土壤环境因子间的关系。结果表明: (1) 9 种藁草群落物种多样性差异性较大, Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Simpson 优势度指数 (D_{si}) 均以青绿藁草群落最高, 亚柄藁草最低; Patrick 丰富度指数 (R) 以异穗藁草群落最高, 细叶藁草群落最低; Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 以凹脉藁草群落最高, 亚柄藁草最低。 (2) 9 种野生藁草属植物适宜生长的土壤 pH 呈中性或弱碱性, 且有机质、氮素、钾素含量较丰富, 磷含量偏低; 土壤有机质、pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量的平均值分别为 $41.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 8.35 、 $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $47.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $100.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 (3) 9 种藁草属植物群落物种多样性与全氮、全磷、全钾、碱解氮、有机质、降雨量和海拔呈正相关关系, 而与土壤 pH、速效磷、速效钾呈负相关关系, 且降雨量、土壤 pH、速效磷和有机质对 9 种野生藁草属植物群落物种多样性影响较大。

关键词: 野生藁草; 分布区; 土壤养分; 群落物种多样性

中图分类号: Q948.113

文献标志码: A

Community Characteristics and Soil Nutrient Status of 9 *Carex* L. Plants in Central and Eastern Gansu Province

KANG Ruiqing, BAI Xiaoming*, RAN Fu, LI Ping, YANG Xiaoni, CHEN Langlang

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province; Sino-U. S. Center for Grazing Lang Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the distribution of *Carex* L. plants in different vegetation types, this study investigated the community characteristics of 9 *Carex* L. plant species in central and eastern Gansu Province, and compared and analyzed the soil nutrient status, to reveal the relationship between the species diversity and distribution communities and soil environmental factors of wild *Carex* L. The results show that: (1) the species diversity of the 9 *Carex* communities was significantly different. The Shannon-Wiener diversity index (H') and Simpson dominance index (D_{si}) were the highest in *Carex breviculmis* community, and the lowest in the *Carex lanceolata* community. The Patrick richness index (R) was the high-

收稿日期: 2022-09-18; 修改稿收到日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金 (31560667); 中国科协产业发展服务项目 (2021XHQB002); 甘肃省林草局草原生态修复治理科技支撑项目 (GSLC-2020-3); 甘肃省科技计划项目 (20JR10RA564)

作者简介: 康瑞卿 (1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为观赏草种质资源和抗逆性。E-mail: 228497805@qq.com

* 通信作者: 白小明, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为草坪科学、草坪草与观赏草种质资源和抗逆性。E-mail: baixm@gsau.edu.cn

est in *Carex heterostachya* community and the lowest in *Carex rigescens* community. The Pielou evenness index (J_{sw}) was the highest in *Carex melanostachya* community and the lowest in *C. lanceolata* community. (2). The soil suitable for the growth of 9 wild *Carex* species was neutral or weakly alkaline, and the contents of organic matter, nitrogen and potassium were rich, but the content of phosphorus was low. The average contents of soil organic matter, pH, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium were $41.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 8.35, $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $5.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $47.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $5.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $100.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. (3) The species diversity of 9 *Carex* species was positively correlated with total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, organic matter, rainfall and elevation, but it was negatively correlated with soil pH, available phosphorus and available potassium. Rainfall, soil pH, available phosphorus and organic matter had great effects on the community species diversity of 9 wild *Carex* species.

Key words: wild *Carex*; distribution area; soil nutrients; community species diversity

藁草属(*Carex* L.)植物为莎草科(Cyperaceae)多年生草本,是草地生态系统的重要建群种,也是湿地及苔原生态系统的的主要植被成分和生产者^[1]。其分布范围广,种类繁多,全世界约有 2000 多种藁草属植物,中国约有 500 种^[2]。藁草属植物不仅可作为牧草和环保植物,也是观赏草中较为重要的一员,其中不少种类因其返青早、色泽好、生长期长、适应性强、美化环境效果好而作为优良草坪地被植物。该属植物以其突出的抗逆性、耐粗放管理等特点在园林绿化中有较高的开发利用价值^[3]。

土壤作为植物生长的载体,为其生长提供了必要的物质基础^[4],土壤理化性质是衡量其肥力和质量的重要指标,直接影响植物的生长和发育^[5]。不同土层的土壤理化性质,不仅决定土壤水、肥、气、热等肥力状况,还影响着降雨入渗和地表径流,以及植物群落的发生、发育和演替速度^[6]。土壤有机碳、全效氮磷钾、速效氮磷钾等可直接调控土壤肥力,进而影响植被的生长,最终影响生态系统功能^[7],为此,植被和土壤之间的关系是生态学研究的重要领域之一^[8]。目前,国内外对植物群落-土壤关系的研究已有不少成果,Kardol 等^[9]发现土壤反馈时间的变化可以控制植物群落的演替,David 等^[10]发现土壤呼吸受植物群落组成的调节,而非生物多样性的影响。也有一些学者对土壤-植被之间的响应关系进行了研究^[11-12],发现植被的数量特征、群落特征与土壤性质存在密切相关性。植物群落的变化受环境因子的制约,且二者表现出一定的同步性,进而导致群落的交替出现^[13],不同类型的植物群落与土壤环境因子相互联系、相互制约,共同构成较为稳定的群落结构^[14]。因此,研究藁草属植物的分布与其生境土壤理化特征,对了解其分布、野生资源开发与利用等方面具有重要的实践意义。

甘肃地处中国西北内陆,气候类型多样,植物种类丰富,藁草属植物约有 72 种,4 变种,种类丰富^[15-16]。目前,国内有关野生藁草属植物的资源分布和调查研究已有报道^[17-23],但藁草属植物分布区环境特性的研究报道较少。因此,本研究通过对甘肃中东部地区 9 种野生藁草属植物种质群落物种多样性进行调查,测定分析其原生生境土壤理化特性,旨在揭示藁草属植物的分布与环境因子之间的关系,为甘肃野生藁草种质资源的开发利用提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

调查区位于甘肃中东部地区,包括武威市、兰州市、定西市、临夏市、天水市、平凉市和庆阳市,大部分地处黄土高原丘陵沟壑区^[24],干旱少雨,土质多为黄绵土,土层深厚,结构疏松。海拔高度 1 028~2 810 m 之间,年降水量 415~640 mm 之间,年均气温 6.5~10 °C 之间^[25]。

1.2 样地调查与采样

根据甘肃各市、县的植被类型和自然环境,经前期调查及查阅文献资料^[15-16,26-28],于 2021 年和 2022 年 4 月至 7 月,采用现场踏查和陆地生物群落典型样方调查的方法^[29],对甘肃中东部地区 9 种藁草植物分布及生境特征进行调查(表 1)。

每个采集地选择群落中野生藁草分布较集中的地段,采用随机样方布点法^[30],在每个样地内随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方,采用针刺法统计植被盖度及物种分盖度,并记录物种数、总株数、高度等;采取记名计数法统计草本物种的频度、多度;利用 GPS 定位记录各样地的地理位置、生境、海拔、经纬度,并拍摄样品生境照片。

表 1 甘肃中东部地区 9 种野生藁草主要分布区地理环境

Table 1 The geographical environments of the main distribution areas of 9 wild *Carex* in central and eastern Gansu Province

编号 Number	物种 Species	分布区 Distribution area	代码 Code	经度/纬度 Longitude/Latitude	海拔 Elevation /m	降水量 Precipitation /mm	生境 Habitat
1	亚柄藁草 <i>Carex lanceolata</i>	榆中 Yuzhong	YBYZ	104.0476°E/35.7801°N	2 276.56	536	乔木林下 Arbor forests
2	青绿藁草 <i>Carex breviculmis</i>	临夏 Linxia	QLLX	103.0894°E/35.4986°N	1 962.02	484	人工林带下 Under the plantation
3	无脉藁草 <i>Carex enervis</i> subsp. <i>enervis</i>	庆城 Qingcheng	WMQC	107.8873°E/35.9762°N	1 028.57	537.5	路边干燥坡 Roadside dry broken
4	青藏藁草 <i>Carex moorcroftii</i>	天祝 Tianzhu	QZTZ	102.7998°E/37.1904°N	2 810.08	500	河谷阶地 Valley terrace
5	异穗藁草 <i>Carex heterostachya</i>	麦积 Maiji	YSMJ	105.5859°E/34.2123°N	1 603.03	650	乔木林下 Arbor forests
6	细叶藁草 <i>Carex rigescens</i>	榆中 Yuzhong	XYYZ	103.8579°E/35.8398°N	2 185.54	350	路边干燥坡 Roadside dry broken
7	陇西藁草 <i>Carex</i> spp.	陇西 Longxi	LXLX	104.4834°E/34.9949°N	1 973	445.8	公路旁边 Side of the highway
8	大披针藁草 <i>Carex lanceolata</i>	崆峒 Kongtong	DPZKT	106.5374°E/35.5599°E	1 440.54	537.5	路边林下 Roadside forests
9	凹脉藁草 <i>Carex melanostachya</i>	崇信 Chongxin	AMCX	107.0296°E/35.3140°E	1 092.16	493.8	农田水渠边 By the cropland canal

植被调查的同时,对样地中野生藁草采集地的土壤采取 S 形随机取样法,以 10 cm 为间隔分 3 层取样(0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm),每个样地 3 次重复。带回实验室风干后研磨过筛,测定各项土壤理化性状指标^[31]。

1.3 测定项目与方法

土壤有机质含量采用重铬酸钾—外加热法;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;土壤速效钾含量用 1 mol·L⁻¹ 中性醋酸铵提取,火焰光度法测定;土壤碱解氮含量采用 KCl 浸提靛蓝比色法;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤全磷含量采用 HClO₄-H₂SO₄ 法;土壤全钾含量采用 NaOH 熔融—火焰光度法;土壤 pH 采用电位法测定(土样和去离子水比为 1:2.5)。以上指标测定均参考鲍士坦的方法^[32]。

1.4 物种多样性指数计算

对样方中各个草本植物数据进行统计处理,计算样方中所有出现的物种重要值(IV),再分别计算物种多样性指数,本研究中物种多样性的测度选用 α 多样性指数的物种丰富度指数、物种均匀度指数和物种多样性指数 3 种,其计算公式如下^[30,33-39]:

$$(1) IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对多度}) \quad (1)$$

$$(2) \text{物种丰富度指数:}$$

$$\text{Patrick 丰富度指数}(R): d_{Ma} = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (2)$$

(3) 物种多样性指数:

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H): H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$\text{Simpson 优势度指数}(D_{si}): D_{si} = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (4)$$

(4) 物种均匀度指数:

$$\text{Pielou 均匀度指数}(J_{sw}): J_{sw} = \frac{H}{\ln S} \quad (5)$$

式中,S 为每一样方内的物种总数; n_i 为第 n_i 个种的个体数;N 为所有种的个体总数;N 为种 i 的重要值。

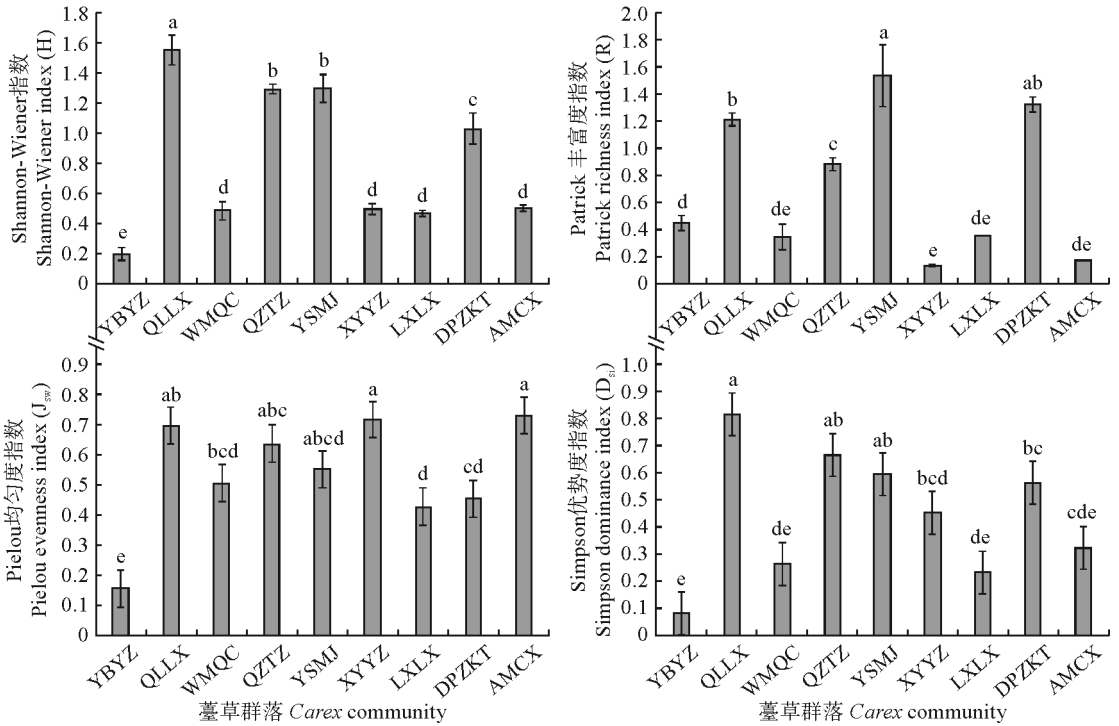
1.5 数据处理

用 Excel 2019 对数据进行统计整理并制图,采用 SPSS 25.0 软件分别对野生藁草群落分布区土壤理化性质及群落物种多样性指数等进行单因素方差分析(One-way ANOVA),使用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,显著性水平设定为 0.05($P < 0.05$)。采用 Canoco5.0 软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),探究藁草属植物群落物种多样性与土壤等环境因子之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 9 种藁草属植物群落物种多样性

图 1 显示,9 种藁草属植物群落物种多样性差异较大,物种丰富度指数(R)以异穗藁草群落最高(1.54),细叶藁草群落最低(0.14);Shannon-Wiener



藁草群落编号同表 1。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

图 1 9 种野生藁草属植物群落物种多样性分析

Codes of *Carex* community are the same as Table 1. Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$). The same as below

Fig. 1 Species diversity analysis of 9 wild *Carex* communities

多样性指数 (H) 和 Simpson 优势度指数 (D_{si}) 表现一致,均以青绿藁草群落最高,分别为 1.55 和 0.82,亚柄藁草群落最低,分别为 0.20 和 0.08; Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 则以凹脉藁草群落最高 (0.73),亚柄藁草最低 (0.16)。整体上看,青绿藁草群落植物多样性最丰富,而亚柄藁草群落植物多样性则相对单一。

2.2 不同藁草属植物群落土壤理化性状

2.2.1 土壤 pH 和有机质含量

土壤酸碱度 (pH) 是土壤许多化学性质特别是岩基状况的综合反映。图 2 表明,9 种野生藁草属植物群落 0~30 cm 土层土壤 pH 值范围为 7.95~8.69,均为弱碱性,其中无脉藁草群落、细叶藁草群落、陇西藁草群落、大披针藁草群落 pH 值均大于 8.5,属碱性土壤,显著高于其余群落,但这 4 个群落间均无显著差异。

不同藁草属植物群落土壤有机质含量差异较大。亚柄藁草群落土壤有机质含量显著高于其他藁草群落 ($P < 0.05$),达到了 $97.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;青藏藁草、青绿藁草和异穗藁草群落次之,分别为 73.06 、 70.07 和 $60.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其他 5 个藁草群落分布区有机质含量范围为 $3.05 \sim 30.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3)。

2.2.2 土壤氮含量

9 种藁草属植物群落土壤全氮含量最高的是青绿藁草群落 ($2.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),亚柄

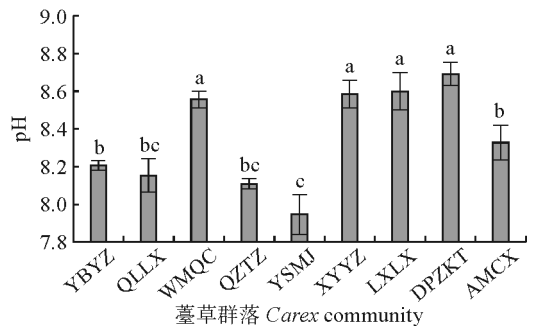


图 2 9 种野生藁草属植物群落分布区土壤 pH
Fig. 2 Soil pH in the distribution area of 9 wild *Carex* species

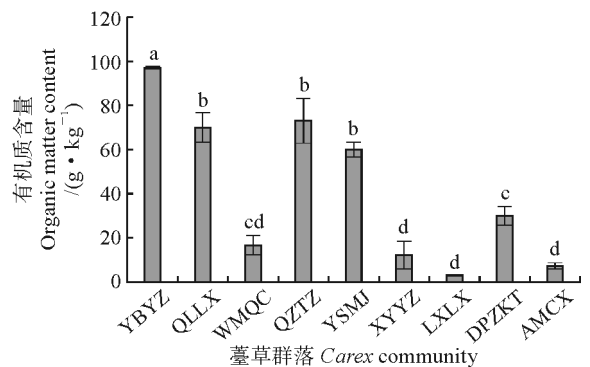


图 3 9 种野生藁草属植物群落分布区土壤有机质含量
Fig. 3 Soil organic matter contents in the main distribution area of 9 wild *Carex* communities

藁草群落和青藏藁草群落次之,分别为 2.08 和 1.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均显著高于除异穗藁草群落外的其他 6 个藁草群落($P < 0.05$)(图 4);土壤全氮含量最低的是凹脉藁草群落(0.29 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。各群落碱解氮含量介于 5.22~101.30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间(图 4),其中含量最高的是亚柄藁草群落(101.30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),青藏藁草群落和青绿藁草群落次之,分别为 95.04 和 73.75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均显著高于其他 6 个藁草群落($P < 0.05$);土壤碱解氮含量最低的是无脉藁草群落(5.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.2.3 土壤磷含量 从图 5 可知,不同藁草属植物群落土壤全磷含量在 0.27~0.81 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中细叶藁草群落全磷含量最丰富(0.81 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),显著高于除亚柄藁草、青绿藁草和异穗藁草群落以外的其他藁草属植物群落($P < 0.05$);陇西藁草群落全磷含量最低(0.27 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),且显著低于其他藁草属植物群落($P < 0.05$)。各群落土壤速效磷含量介于 2.06~11.57 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中无脉藁草群落含量最高(11.57 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且显著高于其他藁草属植物群落($P < 0.05$),大披针藁草群落含量最低(2.06 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但与陇西藁草、青绿藁草和亚柄藁草植物群落间差异不显著($P > 0.05$)。

2.2.4 土壤钾含量 9 种藁草属植物群落土壤钾含量见图 6。青绿藁草群落全钾含量最高(6.46 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),无脉藁草群落最低(4.74 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。各群落土壤速效钾含量差异较大,介于 36.15~248.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中细叶藁草群落显著高于其他藁草群落($P < 0.05$),青绿藁草群落速效钾含量(149.99 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)位居第二;亚柄藁草、无脉藁草、陇西藁草群落速效钾含量在 78.47~134.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;其余 4 种藁草群落速效钾含量在 36.15~64.58 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中大披针藁草群落速效钾含量最低。

2.3 不同藁草属植物群落物种多样性与土壤理化性质的相关性

不同野生藁草属植物群落物种多样性与土壤环境因子双变量相关性分析(表 2)发现,土壤全磷、全钾、速效钾、碱解氮和速效磷与物种多样性、丰富度、优势度、均匀度指数无显著相关性;土壤全氮含量与 Shannon-Wiener ($r=0.406, P < 0.05$)多样性指数呈显著正相关;有机质含量与 Patrick ($r=0.466, P < 0.05$)指数呈显著正相关;pH 与 Shannon-Wiener ($r=-0.474, P < 0.05$)、Patrick ($r=-0.417, P < 0.05$)指数呈显著负相关。

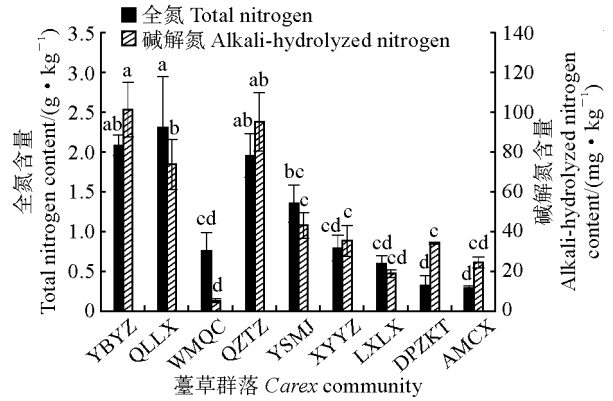


图 4 9 种野生藁草属植物群落土壤氮含量

Fig. 4 Soil nitrogen content of 9 wild *Carex* communities

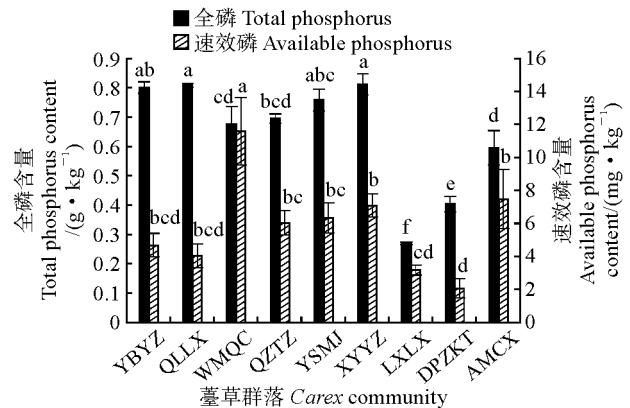


图 5 9 种野生藁草属植物群落土壤磷含量

Fig. 5 Soil phosphorus content of 9 wild *Carex* communities

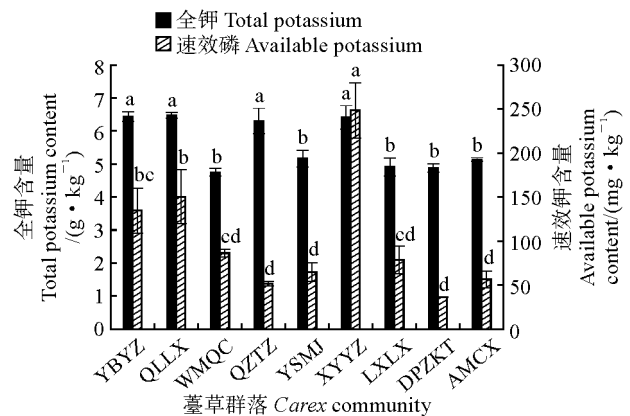


图 6 9 种野生藁草属植物群落分布区土壤钾含量

Fig. 6 Soil potassium content in the main distribution area of 9 wild *Carex* communities

2.4 9 种藁草属植物群落物种多样性与环境因子的 RDA 排序分析

以 4 个物种多样性指标作为响应变量,10 个环境因子作为解释变量,对甘肃中东部地区 9 种藁草属植物 27 个样方中群落的多样性指数及环境因子

进行冗余分析(RDA)并排序(表3),结果显示,排序轴第1轴、第2轴的特征值分别是0.5424和0.1296,物种多样性与环境因子前两个排序轴的相关性分别为0.8189和0.9019,排序轴中,前两轴10个环境因子对物种多样性的累计解释量达67.60%,对物种多样性与环境因子的累计解释量达98.10%。在RDA排序中,蒙特卡洛检验结果显示,藁草群落物种多样性和环境因子在第一排序轴($F=19.13, P=0.018$)和所有排序轴($F=5.8, P=0.002$)显著或极显著相关。整体来看,物种多样性与环境因子之间的排序结果可信,第1、第2排序轴可以较好地解释群落物种多样性指数和环境因子之间的关系。

物种多样性-环境因子冗余分析排序结果(图7)显示,降雨量、OM、pH、AP、AK、TN箭头连线较长,对4个物种多样性指数有较强的影响。TP、TN、TK、AN、OM、降雨量和海拔与C-J_{sw}、C-D_{si}、C-H、C-R四个物种多样性指数箭头方向一致且呈正相关关系,而pH、AP、AK箭头方向相反呈负相关。

对物种多样性影响显著的环境因子主要有降雨量、土壤pH、AP和OM(表4),解释率分别为22.9%、11.3%、8.7%和8.1%。

表4 冗余分析(RDA)环境因子对9种藁草属植物群落物种多样性的解释率

Table 4 Interpretation rate of RDA environmental factors to 9 *Carex* plants community species diversity

环境因子 Environmental factor	解释率 Explain/%	F
降雨量 Precipitation(PRE)	22.9	7.4**
土壤pH Soil pH	11.3	4.1*
土壤速效磷 Soil available phosphorus(AP)	8.7	3.5*
土壤有机质 Soil organic matter(OM)	8.1	3.6*
土壤全磷 Soil total phosphorus(TP)	5.3	2.6
土壤速效氮 Soil available nitrogen(AN)	6.7	3.6
土壤全氮 Soil total nitrogen(TN)	2.7	1.5
土壤速效钾 Soil available potassium(AK)	1.4	0.8
海拔 Elevation(ELE)	1.0	0.5
土壤全钾 Soil total potassium(TK)	0.8	0.4

表2 9种野生藁草属植物群落物种多样性与土壤养分含量的相关性

Table 2 Correlation between species diversity and soil nutrient contents of 9 wild *Carex* species

指标 Index	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	速效钾 Available potassium	碱解氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	有机质 Organic matter	pH
Shannon-Wiener 多样性指数 H	0.406*	0.169	0.136	-0.221	0.277	-0.233	0.353	-0.474*
Patrick 丰富度指数 R	0.265	0.052	-0.004	-0.361	0.239	-0.360	0.466*	-0.417*
Simpson 优势度指数 D _{si}	0.296	0.223	0.148	-0.109	0.200	-0.174	0.197	-0.332
Pielou 均匀度指数 J _{sw}	-0.090	0.117	0.021	0.126	-0.209	0.108	-0.358	-0.092

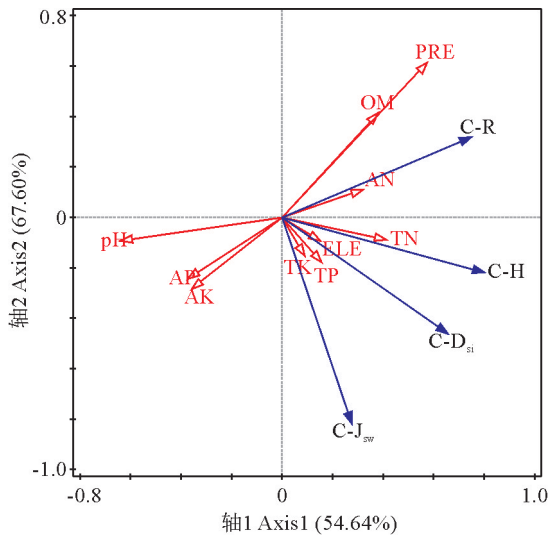
注: *表示在0.05水平显著相关

Note: * stand for the significant correlation at 0.05 level

表3 9种野生藁草属植物群落物种多样性与环境因子冗余分析

Table 3 Redundancy analysis of species diversity and environmental factors of 9 wild *Carex* species

排序概要 Summary of ordination	第1轴 Axis1	第2轴 Axis2
物种多样性特征值 Eigenvalues of species diversity	0.5464	0.1296
物种多样性累计解释量 Cumulative interpretation of species diversity/%	54.6400	67.6000
物种多样性与环境因子相关性 Correlation between species diversity and environmental factors	0.8189	0.9019
物种多样性-环境因子解释拟合变化(累积) Species diversity-environmental factors explained fitted variation (cumulative)/%	79.2900	98.1000
总特征值 Total eigenvalues		1
总典范特征值 Total canonical eigenvalues		0.689 114
第一典范轴的显著性测验 Significant test of the first canonical axis	F=19.3, P=0.018	
所有典范轴的显著性测验 Significant test of all axes	F=3.5, P=0.006	



TN. 全氮; TP. 全磷; TK. 全钾; AN. 碱解氮; AP. 速效磷;

AK. 速效钾; pH. 土壤 pH; OM. 土壤有机质; ELE. 海拔;

PRE. 降雨量; C-J_{sw}. Pielou 均匀度指数;

C-D_{si}. 辛普森指数; C-H. 香农-威纳指数; C-R. Patrick 丰富度指数

图 7 9 个藁草属植物群落物种多样性指数与
环境因子的 RDA 排序图

TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; TK. Total potassium;

AN. Available nitrogen; AP. Available phosphorus;

AK. Available potassium; pH. Soil pH; OM. Soil organic
matter; ELE. Elevation; PRE. Precipitation; C-J_{sw}. Pielou

evenness index; C-D_{si}. Simpson index; C-H. Shannon-

Wiener index; C-R. Patrick richness index

Fig. 7 RDA ordination chart of 9 *Carex* plants community
species diversity index and environmental factors

3 讨论

3.1 野生藁草属植物群落物种多样性特征

物种多样性是判断一个植物群落生态稳定性的指标,一定空间范围内的物种数量和分布特征能体现出植物群落与所处的自然环境之间的关系,是群落组织结构的重要特征^[40]。汪超等^[41]研究表明,林冠层物种组成越复杂,物种多样性越丰富。本研究中青绿藁草、青藏藁草、异穗藁草、大披针藁草等群落分布在林带或沟谷湿地,其群落密集、且土层丰厚,伴生植物种类繁多,它们的 Shannon-wiener 物种多样性指数都较高;而无脉藁草、细叶藁草、凹脉藁草等群落分布于干燥坡或农田水渠边,受人为干扰较多,土壤瘠薄、伴生植物少,它们的 Shannon-wiener 多样性指数均较低。庞莉莉等^[20]的研究显示,藁草属植物群落物种多样性指数变化基本随物种丰富度的增加而增加,与优势度变化相反。而本研究发现不同藁草属群落之间物种多样性变化基本

上与物种丰富度、物种优势度变化趋势一致,但与均匀度的变化却有所差异;例如研究区大披针藁草群落物种多样性指数、优势度指数和丰富度指数相对较高,但均匀度指数则相对较低,其原因可能是群落物种多样性和丰富度程度越大,物种对生境的分割程度就越大,因而导致群落物种均匀度的降低^[38],也可能与藁草群落所处的生境以及人为干扰程度相关。本研究还发现藁草属群落之间物种多样性、丰富度与均匀度指数变化并不一致,反而有相反的趋势,例如研究区亚柄藁草群落,其物种多样性指数和均匀度指数最小,但丰富度指数却相对较高;异穗藁草群落和大披针藁草群落物种多样性指数和丰富度指数相对较高,但均匀度指数反而较低。这与杨冲等^[37]在三江源地区的研究结果相似。

3.2 野生藁草属植物群落土壤环境因子的变化规律

土壤是植物生存的基础,它所提供的养分对植物的生长与形态建成起着关键作用,植物利用根系吸收土壤中的养分,其中以有机质、氮、磷、钾为主^[18,42]。本研究发现,藁草属植物群落主要分布于中性或弱碱性土壤中,研究区多为林下、河谷等地,凋落物较多,有机质含量较丰富,这为藁草属植物的生长提供良好的生存环境,且有机质含量的高低直接影响氮素的供应水平,以上结果均与王青山^[43]、王林^[44]等的研究结果一致。张家培^[18]的研究表明,藁草属植物多生长于中、碱性且有机质、氮、磷、钾含量较高的土壤环境中;而本研究发现藁草植物土壤磷含量偏低,其原因可能是土壤磷含量与成土母质有关,陇东地带大多分布着丘陵沟壑的黑垆土和黄绵土,而中部地带大多分布着灰钙土和黄绵土,土壤类型和气候因素的不同^[45],导致研究区藁草植被分布差异较大;加之研究区分布于甘肃中东部地区,雨热同季,年均气温在 6.5~10 °C 间,可加快土壤有机质的分解,从而刺激植物的生长,加大对土壤磷的吸收^[46];此外,中东部区较陇南地区而言,少雨干旱,也会影响土壤有机质的分解和积累,从而不利于磷的矿化和固定,使得磷大量缺失^[47]。同时,研究区藁草群落土壤中磷素随植被类型的丰富而有降低的趋势^[48]。

3.3 野生藁草属植物群落物种多样性与环境因子之间的关系

近年来,环境因子与植被群落的关系一直是生态学家研究的热点^[49],土壤环境因子与植物多样性显著相关,不同学者的研究结果有所不同^[50]。王琳

等^[51]和杨小波等^[52]研究显示,土壤 OM、TP 和 AP 与物种多样性有显著相关性,汪攀等^[53]研究表明,丰富度指数、Shannon-Winner 指数、均匀度指数和优势度指数与土壤 OM、TN、TP 含量显著相关,与 TK 含量无显著相关性。黄燕等^[54]报道土壤环境因子中对植物多样性影响最大的指标是 TP、TN、AN,其次是 OM、TK、AP。也有研究表明,物种多样性的尺度格局是由水分和温度共同决定的^[55],在水分充足时,温度是影响物种丰富度的主要因子,降水不足时则受降雨量的控制。叶鹏程等^[56]对东台市野生草本植物研究时发现,物种多样性主要受温度和降雨量的影响,且温度对物种丰富度的影响更大。Fábio 等^[57]通过研究英国的木本和草本植物,发现物种丰富度在很大程度上与年均温度和降水量有关,且年均温度是最重要的影响因素。本研究 RDA 排序结果表明,藁草属植物物种多样性的变化与降雨量呈极显著相关,与 pH、AP 和 OM 显著相关,说明降雨量、pH、AP、OM 是对甘肃中东部地区藁草植被生长影响较大的环境因子。甘肃中东部地区镶嵌于陇中、东黄土高原地带,且干旱少雨,年降水量自东南向西北减少^[58],降雨量作为影响藁草生长最主要的环境因子,直接影响着藁草群落物种多样性的分布格局。研究区的异穗藁草、大披针藁草和青绿藁草等群落分布于乔木林下,降雨量充沛,水分条件充足,物种多样性和丰富度较高;而细叶藁草、凹脉藁草、无脉藁草等群落分布的区域降雨量少,水分条件差,因而多样性水平较低。

pH 也是影响野生藁草群落物种多样性的重要因素之一。宁盼等^[59]的研究表明,物种多样性指数

与土壤 pH 呈显著正相关;徐治国等^[60]和任学敏等^[61]的研究发现,土壤最佳养分 pH 的阈值在 5.6~6.8 之间,超过或低于该阈值范围都将不利于植物的生长,同时,在该阈值范围内,土壤 pH 值与物种多样性之间呈显著正相关。而本研究土壤 pH 偏中性或弱碱性,且土壤 pH 与物种多样呈显著负相关关系,其原因可能是群落的演替退化使土壤表层蒸发变强,增加了碱金属离子的浓度,使土壤 pH 偏碱性^[62]。藁草属植物群落的结构及多样性的大小除了受土壤、降雨量等因素影响外,可能还受人为干扰、气候、水域等各种因素的影响。

4 结 论

本研究通过探讨甘肃中东部地区 9 种野生藁草属植物群落物种多样性特征、生境土壤理化性质及藁草群落物种多样性与环境因子之间的关系,得出以下结论:

(1) 9 种藁草群落物种多样性差异性较大,Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Simpson 优势度指数(D_{si})均以青绿藁草群落最高,亚柄藁草最低;物种丰富度指数(R)以异穗藁草群落最高,细叶藁草群落最低;Pielou 均匀度指数(J_{sw})以凹脉藁草群落最高,亚柄藁草最低。

(2) 9 种野生藁草属植物适宜生长的土壤呈中性或弱碱性,且研究区内有机质、氮素、钾素含量较丰富,磷含量偏低。

(3) 降雨量、土壤 pH、AP 和 OM 是甘肃中东部地区藁草属植物群落物种多样性影响较大的环境因子。

参考文献:

- [1] 薛红,沙伟,倪红伟. 藁草属植物研究概况[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2005, **21**(4): 81-86.
XUE H, SHA W, NI H W. General survey of *Carex* species [J]. *Journal of Qiqihar University* (Natural Science Edition), 2005, **21**(4): 81-86.
- [2] 叶艳然,王文莉,郑成淑,等. 4 种野生苔草属植物的耐寒性评价[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(1): 89-95.
YE Y R, WANG W L, ZHENG C S, et al. Evaluation of cold resistance of four wild *Carex* species [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(1): 89-95.
- [3] 王俊强,吕会刚,方唯,等. 苔草属种质资源的研究与应用[J]. 北京园林, 2006, **22**(2): 36-38.
WANG J Q, LÜ H G, FANG W, et al. Research and appli-

cation of *Carex* germplasm resources [J]. *Beijing Botanical Garden*, 2006, **22**(2): 36-38.

- [4] 吕宸,宫渊波,龚伟,等. 川西高寒山地灌丛草甸土壤水文效应特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(5): 1 170-1 177.
LÜ C, GONG Y B, GONG W, et al. Characteristics of soil hydrological effects of alpine shrub meadow in western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, **27**(5): 1 170-1 177.
- [5] HALE R, REICH P, DANIEL T, et al. Scales that matter: Guiding effective monitoring of soil properties in restored riparian zones [J]. *Geoderma*, 2014, **228-229**: 173-181.
- [6] 梁士楚,苑晓霞,卢晓明,等. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J]. 生态学报, 2019, **39**(8): 2 752-2 761.

- LIANG S C, YUAN X X, LU X M, *et al.* Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2 752-2 761.
- [7] 谭学进, 穆兴民, 高 鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 713-722.
- TAN X J, MU X M, GAO P, *et al.* Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the loess plateau [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 713-722.
- [8] 王 迪, 赵锦梅, 雷隆举, 等. 祁连山东段高寒植被类型对土壤理化特征的影响[J]. 水土保持通报, 2021, **41**(1): 35-40.
- WANG D, ZHAO J M, LEI L J, *et al.* Soil physical and chemical properties of different alpine plants in eastern Qilian Mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(1): 35-40.
- [9] KARDOL P, MARTIJN BEZEMER T, VAN DER PUTTEN W H. Temporal variation in plant-soil feedback controls succession[J]. *Ecology Letters*, 2006, **9**(9): 1 080-1 088.
- [10] JOHNSON D, PHOENIX G K, GRIME J P. Plant community composition, not diversity, regulates soil respiration in grasslands[J]. *Biology Letters*, 2008, **4**(4): 345-348.
- [11] 文海燕, 赵哈林. 退化沙质草地植被与土壤分布特征及相关分析[J]. 干旱区研究, 2004, **21**(1): 76-80.
- WEN H Y, ZHAO H L. Analysis on the distribution and correlation of the vegetation characteristics and soil properties over the degenerated sandy grasslands [J]. *Arid Zone Research*, 2004, **21**(1): 76-80.
- [12] 杨梅焕, 朱志梅, 曹明明, 等. 毛乌素沙地东南缘不同沙漠化阶段土壤-植被关系研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 181-187.
- YANG M H, ZHU Z M, CAO M M, *et al.* Study on the correlation of soil-vegetation in different desertification stages on the southeastern edge of Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(5): 181-187.
- [13] 王顺忠, 陈桂琛, 孙 菁, 等. 青海湖鸟岛盐碱地植被演替的初步研究[J]. 西北植物学报, 2003, **23**(4): 550-553.
- WANG S Z, CHEN G C, SUN J, *et al.* Primary study on vegetation succession of saline land in the bird island of Qinghai Lake [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, **23**(4): 550-553.
- [14] 刘 婧, 缙倩倩, 王国华, 等. 晋西北丘陵风沙区 50 年林龄人工柠条林植被群落及其土壤特性变化[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(1): 219-230.
- LIU J, GOU Q Q, WANG G H, *et al.* Changes of vegetation community and soil characteristics of 50 years old artificial *Caragana korshinskii* in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(1): 219-230.
- [15] 杨永昌. 甘肃藁草属植物的地理分区、区系特点及其与青藏高原藁草植物的关系[J]. 高原生物学集刊, 1984, (3): 96-106.
- YANG Y C. Geographical division and floristic characteristics of *Carex* in Gansu and its relationship with *Carex* in Qinghai Plateau[J]. *Journal of Plateau Biology*, 1984, (3): 96-106.
- [16] 杨永昌. 甘肃藁草属新分类群[J]. 高原生物学集刊, 1984, (3): 85-93.
- YANG Y C. New taxa of *Carex* from Gansu[J]. *Journal of Plateau Biology*, 1984, (3): 85-93.
- [17] 杨学军, 武菊英, 滕文军, 等. 北京藁草属植物资源调查与园林应用评价[J]. 广西植物, 2014, **34**(5): 664-669.
- YANG X J, WU J Y, TENG W J, *et al.* Investigation and landscape application evaluation on *Carex* resources in Beijing [J]. *Guihaia*, 2014, **34**(5): 664-669.
- [18] 张家培. 河北省野生苔草资源调查引种及宽叶苔草耐阴性研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2021.
- [19] 修 娜. 秦岭野生苔草植物种质资源与引种试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [20] 庞莉莉, 李玉双, 陈 洁, 等. 江苏野生苔草属植物资源调查与多样性分析[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(5): 75-79.
- PANG L L, LI Y S, CHEN J, *et al.* Nature resource and species diversity of *Carex* in Jiangsu Province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, **43**(5): 75-79.
- [21] 杨秀云, 武小钢. 山西省野生苔草属植物资源调查及坪用性状比较[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(4): 260-263.
- YANG X Y, WU X G. The survey about nature resource and the comparison on turf character of *Carex* in Shanxi Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(4): 260-263.
- [22] 宁 花. 山东苔草属种质资源遗传多样性分析及抗旱性研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- [23] 庾 强, 孙吉雄, 王 云. 内蒙古典型草原野生草坪草种的收集和栽培试验[J]. 草原与草坪, 2005, **25**(4): 34-38.
- YU Q, SUN J X, WANG Y. Wild turfgrass species collecting and its planting experiments in Inner Mongolia typical grassland[J]. *Grassland and Turf*, 2005, **25**(4): 34-38.
- [24] 李智燕, 王 延, 王汝富, 等. 甘肃中东部地区山地苜蓿机械化收获现状及建议[J]. 甘肃畜牧兽医, 2020, **50**(11): 16-18.
- LI Z Y, WANG Y, WANG R F, *et al.* Present situation and suggestions of mechanized harvesting of alfalfa in mountainous areas of central and eastern Gansu Province[J]. *Gansu Animal Husbandry and Veterinary*, 2020, **50**(11): 16-18.
- [25] 刘艳艳. 甘肃中东部旱作农业区气候变化特征及其对农业生产的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2010.
- [26] 金秋艳. 甘肃兴隆山国家级自然保护区森林植被分布状况分析[J]. 甘肃科技, 2016, **32**(21): 130-133.
- JIN Q Y. Analysis of forest vegetation distribution in Xinglongshan national nature reserve, Gansu Province[J]. *Gansu Science and Technology*, 2016, **32**(21): 130-133.
- [27] 耿 新. 中国藁草属密花藁草组(莎草科)的分类研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2018.

- [28] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 第8卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [29] 周 萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区铁杆蒿群落植被特性及土壤养分特征研究[J]. 草业学报, 2008, **17**(2): 9-18.
ZHOU P, LIU G B, HOU X L. Study on vegetation and soil nutrient characters of *Artemisia sacrorum* communities in hilly-gully region of the loess plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, **17**(2): 9-18.
- [30] 白家焯, 刘卫华, 赵冰清, 等. 芦芽山荷叶坪亚高山草甸生物多样性[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(2): 389-396.
BAI J Y, LIU W H, ZHAO B Q, *et al.* Biodiversity of sub-alpine meadow in heyeping of Luya Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(2): 389-396.
- [31] 何 迅, 巩细民. 土壤样品的采集与制备技术[J]. 湖北农业科学, 2003, **42**(3): 47-48.
HE X, GONG X M. Collection and preparation technology of soil samples[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003, **42**(3): 47-48.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981: 25-106.
- [33] RU W M, ZHANG J, ZHANG F, *et al.* Species diversity and community structure of forest communities in Lishan Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(4): 561-566.
- [34] 刘少冲, 段文标, 冯 静, 等. 林隙对小兴安岭阔叶红松林树种更新及物种多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(6): 1 381-1 388.
LIU S C, DUAN W B, FENG J, *et al.* Effects of forest gap on tree species regeneration and diversity of mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(6): 1 381-1 388.
- [35] YING C. Detecting effect of phylogenetic diversity on seedling mortality in an evergreen broad-leaved forest in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**: 1 084-1 089.
- [36] ULANOWICZ R E. Information theory in ecology[J]. *Computers & Chemistry*, 2001, **25**(4): 393-399.
- [37] GREENBERG J H. The measurement of linguistic diversity [J]. *Language*, 1956, **32**(1): 109.
- [38] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, **5**(1): 3-55.
- [39] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, **13**: 131-144.
- [40] 王伯荪. 植物群落学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 44-46.
- [41] 汪 超, 王孝安, 郭 华, 等. 黄土高原马栏林区主要森林群落物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(4): 791-797.
WANG C, WANG X A, GUO H, *et al.* Species diversities of major communities in Malan forest region of the loess plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(4): 791-797.
- [42] 白小明, 张咏梅, 陈 辉, 等. 甘肃野生草地早熟禾(*Poa pratensis*)分布区土壤养分状况[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(6): 242-249.
BAI X M, ZHANG Y M, CHEN H, *et al.* Soil nutrient status of *Poa pratensis* distribution areas in Gansu, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, **40**(6): 242-249.
- [43] 王青山, 何利平. 土壤有机质与氮素供应的相关关系[J]. 山西林业科技, 2003, **32**(S1): 25-27.
WANG Q S, HE L P. Relations between the manure and nitrogen supply in the soil[J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2003, **32**(S1): 25-27.
- [44] 王 林, 许自成, 卢秀萍, 等. 烤烟烟碱含量与土壤有机质、氮素含量的关系分析[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (6): 58-60.
WANG L, XU Z C, LU X P, *et al.* Relationship between nicotine content in flue-cured tobacco leaf and contents of organic matter and nitrogen in soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007, (6): 58-60.
- [45] 丁秋祎, 白军红, 高海峰, 等. 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(10): 2 092-2 097.
DING Q Y, BAI J H, GAO H F, *et al.* Soil nutrient contents in Yellow River Delta wetlands with different plant communities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(10): 2 092-2 097.
- [46] WRIGHT R F. Effect of increased carbon dioxide and temperature on runoff chemistry at a forested catchment in southern Norway (CLIMEX project)[J]. *Ecosystems*, 1998, **1**(2): 216-225.
- [47] 唐立涛, 刘 丹, 罗雪萍, 等. 青海省森林土壤磷储量及其分布格局[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(12): 1 091-1 103.
TANG L T, LIU D, LUO X P, *et al.* Forest soil phosphorus stocks and distribution patterns in Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(12): 1 091-1 103.
- [48] 杨桂山, 施雅风, 张 琛. 江苏滨海潮滩湿地对潮位变化的生态响应[J]. 地理学报, 2002, **57**(3): 325-332.
YANG G S, SHI Y F, ZHANG C. The ecological response of typical mud flat to sea level change in Jiangsu coastal plain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(3): 325-332.
- [49] 赵景学, 曲广鹏, 多吉顿珠, 等. 藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(6): 105-108.
ZHAO J X, QU G P, DUO Jidunzhu, *et al.* Relationship between species diversity and soil factors of alpine grasslands in north Tibet[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(6): 105-108.
- [50] 刘子玥, 王祎宸, 骆丕昭, 等. 湘西石漠化地区植物多样性

- 与土壤因子的耦合关系[J]. 森林与环境学报, 2021, **41**(5): 471-477.
- LIU Z Y, WANG Y C, LUO P Z, *et al.* Coupling relationships between plant diversity and soil characteristics in rocky desertification areas of western Hunan[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, **41**(5): 471-477.
- [51] 王琳, 张金屯, 上官铁梁, 等. 历山山地草甸的物种多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2004, **10**(1): 18-22.
- WANG L, ZHANG J T, SHANGGUAN T L, *et al.* Species diversity of mountain meadow of Lishan and the relation with the soil physicochemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, **10**(1): 18-22.
- [52] 杨小波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 2002, **22**(2): 190-196.
- YANG X B, ZHANG T L, WU Q S. The relationship between biodiversity and soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(2): 190-196.
- [53] 汪攀, 王霖娇, 盛茂银. 西南喀斯特石漠化生态系统植物多样性、土壤生态化学计量特征及其相关性分析[J]. 南方农业学报, 2018, **49**(10): 1 959-1 969.
- WANG P, WANG L J, SHENG M Y. Plant diversity, ecological stoichiometry characteristics of soils and their correlation of the Karst rocky desertification ecosystem in southwestern China[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, **49**(10): 1 959-1 969.
- [54] 黄燕, 庞兴宸, 陈景锋, 等. 广佛地区典型湿地类型植物多样性与土壤因子的关系[J/OL]. 热带亚热带植物学报, 2022, **31**(3): 1-12.
- HUANG Y, PANG X C, CHEN J F, *et al.* Relationship between plant diversity and soil factors in typical wetland types in Guangfo area[J/OL]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2022, **31**(3): 1-12.
- [55] WRIGHT D H. Species-energy theory: An extension of species-area theory[J]. *Oikos*, 1983, **41**(3): 496.
- [56] 叶鹏程, 陈慧, 张光富, 等. 江苏东台野生草本植物多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2022, **41**(3): 133-141.
- YE P C, CHEN H, ZHANG G F, *et al.* Wild herb diversity and its relationship with environmental factors in Dongtai County, Jiangsu Province[J]. *Ecological Science*, 2022, **41**(3): 133-141.
- [57] ALBUQUERQUE F S, OLALLA-TÁRRAGA M Á, MONTOYA D, *et al.* Environmental determinants of woody and herb plant species richness patterns in Great Britain[J]. *Écoscience*, 2011, **18**(4): 394-401.
- [58] 刘新伟. 甘肃暴雨天气气候特征及其成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [59] 宁盼, 侯晓巍, 胡云云, 等. 青海省大果圆柏群落物种多样性与土壤因子的关系[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(11): 1 924-1 931.
- NING P, HOU X W, HU Y Y, *et al.* Relationship between species diversity of *Juniperus tibetica* community and soil factors in Qinghai Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(11): 1 924-1 931.
- [60] 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.
- XU Z G, HE Y, YAN B X, *et al.* The influence of plant N/P, soil pH value on wetland plant species richness[J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(3): 346-349.
- [61] 任学敏, 杨改河, 王得祥, 等. 环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 605-613.
- REN X M, YANG G H, WANG D X, *et al.* Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an *Abies fargesii*-*Betula utilis* mixed forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(2): 605-613.
- [62] 杨元武, 李希来, 周旭辉, 等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报, 2016, **24**(6): 1 211-1 217.
- YANG Y W, LI X L, ZHOU X H, *et al.* Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, **24**(6): 1 211-1 217.

(编辑:潘新社)