

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.023

引用格式:郭万里,刘爽达,吴凡,等.兰州市永登县不同草地类型植物多样性特征及其影响因子分析[J].草地学报,2026,34(7):2603–2614

GUO Wan-li, LIU Shuang-da, WU Fan, et al. Analysis of Plant Diversity Characteristics and Influencing Factors in Different Grassland Types of Yongdeng County, Lanzhou City[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2603–2614

兰州市永登县不同草地类型植物多样性特征 及其影响因子分析

郭万里^{1,2}, 刘爽达^{2,3}, 吴凡^{1,2}, 王兰兰⁴, 刘旻霞^{3*}, 张吉宇^{1,2*}

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃兰州 730020; 2. 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃兰州 730020; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070; 4. 兰州植物园, 甘肃兰州 730070)

摘要:草本植物多样性分布格局及其驱动机制是制定生态保护策略的关键科学依据。本研究以兰州市永登县为研究区,采用网格样方法,系统调查了温性草原、温性荒漠草原、高寒草甸和栽培草地四种生境下的草本植物群落,并探究了地形与土壤因子对物种多样性的影响。结果表明:(1)研究区共记录野生草本植物53科197属356种,以禾本科、菊科和豆科为优势科(占总种数的38%)。(2)地形因子对多样性的影响具有生境特异性:alpha多样性指数随海拔的变化趋势在不同草地类型间差异显著,其中温性草原的响应最为敏感;物种丰富度对坡度和坡向呈现显著的单峰非线性响应,由于水热条件的差异,阴坡及平缓坡度的物种丰富度最高。(3)土壤养分是驱动多样性变化的重要因素:物种丰富度与土壤总碳呈正相关,而与土壤总氮、全磷呈显著负相关($P<0.05$)。(4)多变量分析进一步揭示,物种丰富度主要受土壤碳含量的驱动($P<0.05$),辛普森指数与土壤磷含量极显著相关($P<0.01$),香农-维纳指数则与均匀度指数存在显著的协同变化关系($P<0.05$)。

关键词:草本植物多样性;草地类型;环境驱动因素;地形;土壤养分;永登县

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2603-12

Analysis of Plant Diversity Characteristics and Influencing Factors in Different Grassland Types of Yongdeng County, Lanzhou City

GUO Wan-li^{1,2}, LIU Shuang-da^{2,3}, WU Fan^{1,2}, WANG Lan-lan⁴, LIU Min-xia^{3*}, ZHANG Ji-yu^{1,2*}

(1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu Province 730020, China; 2. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou, Gansu Province 730020, China; 3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 4. Lanzhou Botanical Garden, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: Elucidating the distribution patterns and driving mechanisms of herbaceous plant diversity provides a critical scientific basis for developing ecological protection strategies. This study conducted a systematic survey of herbaceous plant communities in Yongdeng County, Lanzhou City, using a grid sampling method. We investigated four distinct habitat types-temperate steppe, temperate desert steppe, alpine meadow, and cultivated grassland-to explore the effects of topographic and soil factors on species diversity. The results indicated that: (1) A total of 356 wild herbaceous species belonging to 197 genera and 53 families were recorded. Poaceae, Asteraceae, and Fabaceae were the 3 dominant families, accounting for 38% of the total species richness. (2) The effects of topographic factors on diversity were habitat-specific. The trends of alpha-diversity indices along the elevational gradient differed significantly among grassland types, with the temperate steppe showing the most sensitive response. Species rich-

收稿日期:2025-02-03;修回日期:2025-03-27

基金项目:甘肃省科技重大专项计划(23ZDNA009);兰州市野生草本植物资源调查(GSCLZBDL2022-004,GSCLZBDL2023-004)资助

作者简介:郭万里(1995-),男,汉族,甘肃平凉人,博士,主要从事草地生态修复研究,E-mail:guowl2023@lzu.edu.cn;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: xiaminl@163.com; zhangjy@lzu.edu.cn

ness exhibited a significant unimodal non-linear response to slope gradient and aspect; notably, species richness peaked on shady slopes and gentle slopes due to favorable hydrothermal conditions. (3) Soil nutrients were identified as key drivers of diversity variation. Species richness was positively correlated with soil total carbon, but it showed significant negative correlations with soil total nitrogen and total phosphorus ($P < 0.05$). (4) Multivariate analysis further revealed that species richness was primarily driven by soil carbon content ($P < 0.01$). The Simpson index was significantly correlated with soil phosphorus content ($P < 0.01$), while the Shannon-Wiener index showed a significant co-variation with the evenness index ($P < 0.05$).

Key words: Herbaceous plant diversity; Grassland types; Environmental drivers; Topography; Soil nutrients; Yongdeng County

草本植物作为生态系统的重要组成部分,其物种多样性不仅是群落物种丰富度与均匀度的综合反映,更是表征群落稳定性、演替阶段及可持续发展潜力的关键指标^[1-4]。因此,深入探究草本植物多样性的分布格局及其驱动机制,对于理解群落构建过程及生态系统功能保护具有重要的理论意义^[5]。然而,目前相关研究^[1,5]多聚焦于乔木层或林下植被,针对草本植物群落独立及其与环境因子耦合关系的深入研究相对较少。

在兰州及周边地区,已有学者针对草本植物资源开展了多维度的基础调查。在群落组成与区系分析方面,马良杰等^[6]与石善斌等^[7]先后对兰州南北两山的植被进行了跨生长季的调查,发现该区域的植物以一年生草本为主,优势科主要集中在禾本科、菊科、豆科和藜科等;王玲等^[11]进一步对连城保护区的种子植物区系进行了系统分析。在资源利用与评价方面,许金凤等^[8]基于重要值指标探讨了物种在群落中的地位;秦冬梅等^[9]从园林景观结合的角度评估了野生观赏草资源;鲁滨^[10]则聚焦于永登地区的药用植物,发现其物种丰富度随海拔升高呈现“先增加后减少”的单峰变化趋势。

环境梯度的异质性是驱动物种多样性空间分异的根本原因。海拔梯度因综合了水热因子的变化,显著影响着植物多样性的垂直分布格局^[12-13];且相较于木本植物,草本植物对地理距离及环境因子的响应机制更为独特^[14]。微地形与土壤理化性质亦是关键的限制因子,冷流江等^[15]的研究表明,坡向导致的生境差异使得阴坡及半阴坡的多样性指数较高,而土壤含水量和有效磷含量则是影响植被多样性的主要土壤驱动因子。

综上所述,尽管已有部分研究关注永登县及其境内的连城国家级自然保护区,但现有的工作仍存在明显的局限性。首先,该区域地处青藏高原、黄土高原和内蒙古高原的交汇过渡地带,气候干旱且生态环境脆弱,典型的旱生及荒漠型草本植物群落最具代表性,但既往调查多侧重于保护区内的木本植物及鸟类

资源,针对野生草本植物的系统性研究相对匮乏。其次,草本植物具有个体矮小、生命周期短、季节性枯荣显著等生物学特性,导致野外调查难度大、数据更新快,而早期的调查数据在时间上较为久远,且往往存在调查范围局限、海拔梯度设置不全等问题,难以全面反映当前的物种分布现状及动态变化。

鉴于此,本研究拟对兰州市永登县不同草地类型的草本植物进行系统性的物种组成及数量调查,深入分析物种丰富度和alpha多样性对地形及土壤环境因子的响应机制,旨在摸清该区域草本植物的资源底数,以期为区域生物多样性评估、优良种质资源保护及生态文明建设提供科学依据和数据支撑^[16]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永登县位于甘肃省中部,兰州市西北部($102^{\circ}36' \sim 103^{\circ}46' \text{E}$, $36^{\circ}12' \sim 37^{\circ}10' \text{N}$),海拔在1600~3000 m之间。县境南北长107 km,东西宽101 km,总面积5846.73 km²。地貌上表现为石质山地与黄土丘陵交错分布。地势位于青藏高原东北部与黄土高原西部过渡地带,也是祁连山支脉东延与陇西沉降盆地间交错的过渡地区。属大陆性季风气候,自然降水稀少、蒸发量大,光能资源适中,干旱、冰雹、洪水、霜冻等自然灾害频繁。由于气候和地形的差异,形成了不同的植被类型和丰富的草本植物,植被类型多为旱生型和荒漠型草本植物。

1.2 样地设置及植被调查

2022年8月、9月和2023年5月在兰州市永登县境内进行野生植物资源调查。按照不同草地类型(温性草原、温性荒漠草原、高寒草甸和栽培草地)实地调查。使用Arcgis 10.8软件以三分经纬网交叉点设置样地(图1),网格面积为10 km×10 km,每个网格2~3个样方。根据地形(Terrain, TER)、

海拔 (Altitude, ALT)、坡度 (Slope, SLO)、坡向 (Aspect, ASP) 和草地类型 (Grassland types, GT) 设置样方^[17]。样方大小: 在植被分布均匀的样地, 无高大草本的样本面积为 1 m×1 m, 有高大草本为 2 m×2 m, 有半灌木或灌木为 5 m×5 m。在植被分布不均匀的样地, 无高大草本为 2 m×2 m, 微生物较多或有高大草本、半灌木或灌木为 5 m×5 m。共设置 83 个样地, 详见表 1。记录草本植物名称、数量、高

度和盖度, 之后对植物种名用植物志 (<http://www.iplant.cn/>) 进行鉴定和确认。同时, 记录经纬度、海拔, 测定坡度、坡向, 并记录坡位等环境因子特征。在每个样方内使用直径为 5 cm 的土钻采集 0~20 cm 的土样, 采土方法为对角线法采土, 采好的土样使用 8 号自封袋密封保存, 每个土样保存 250 g 左右, 剩余土样在避光环境下风干并进行研磨, 用于土壤理化因子测定分析。

表 1 草地类型及样方数量

Table 1 Grassland types and number of plots

草地类型 Grassland types	海拔 Altitude/m	样地数量 Number of plots	样地编号 Plot number
栽培草地 Cultivated grassland	1600~1900	15	27, 33, 35, 40, 42, 44, 46, 47, 57, 60, 66, 68, 72, 76, 80
温性草原 Temperate grassland	1600~2700	47	14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 39, 41, 43, 45, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 77, 78, 79
温性荒漠草原 Temperate desert grassland	2100~2700	16	2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 15, 25, 26, 36, 37, 38, 51
山地草甸 Mountain meadow	2800~3000	5	1, 6, 8, 9, 20

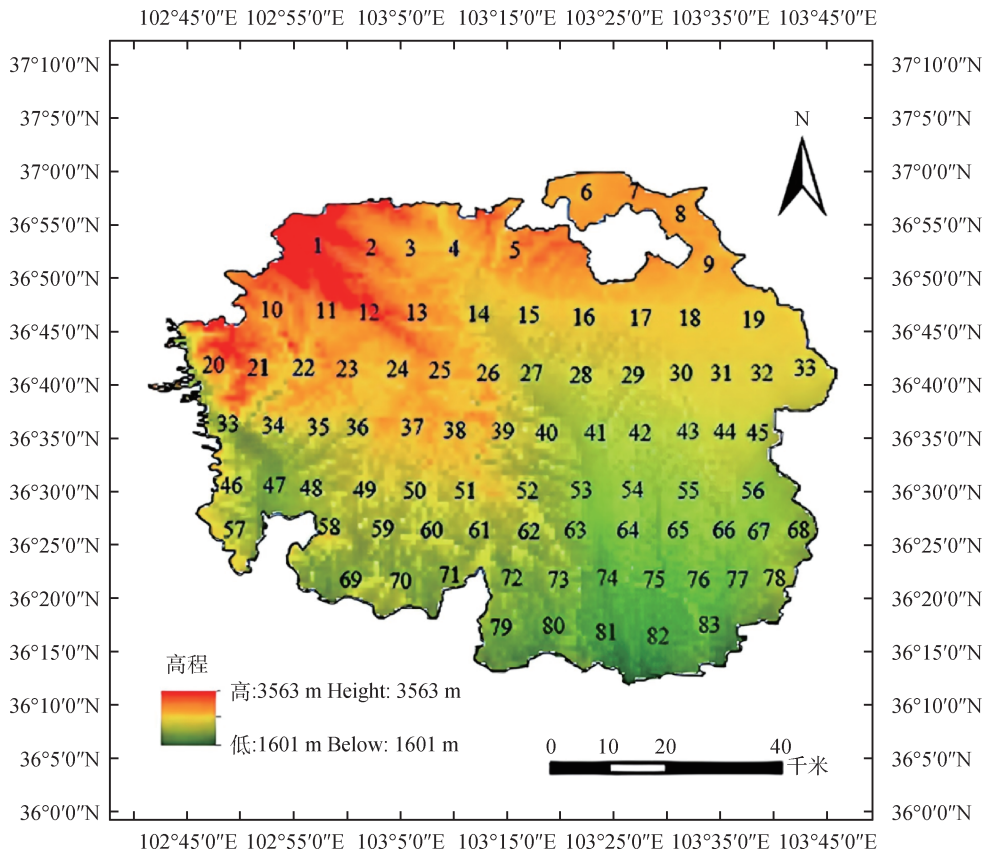


图 1 网格及样地分布图

Fig. 1 Grid and plot distribution map

注: 图中 1~83 表示设置的 83 个样地的编号

Note: The numbers 1-83 in the diagram denote the designations of the 83 sample plots established

1.3 数据处理及统计分析

为量化地形因子的生态效应, 参照文献^[18]的方法, 将调查样地的坡向划分为 4 个等级, 坡度划分为

6 个等级, 并分别进行数值化赋值 (表 2)。本研究选取以下指标表征草本植物群落特征: 物种重要值 (V)、物种丰富度指数 (S)、Shannon-Wiener 多样性

指数(H')、Simpson 优势度指数(D)及 Pielou 均匀度指数(J),具体计算见公式(1)~(5)^[19-20]。其中,我们在此将 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数及 Pielou 均匀度指数在后续的分析中重新表示,分别为 HH 、 HD 和 HE 。环境解释变量涵盖地形与土壤理化性质两类。其中,ALT、SLO 和 ASP 均为实地测量数据;土壤全碳(STC)与全氮(STN)采用总有机碳分析仪测定,土壤全磷(STP)采用连续流动分析仪(FIAstar 5000)测定。

采用 Microsoft Excel 软件建立数据库,对实验数据进行初步整理及误差分析。选取物种丰富度指数

(Richness)及 alpha 多样性指数表征研究区野生草本植物群落的多样性特征。利用 R(4.5.2)对环境因子与多样性指数进行 Pearson 相关性分析(Pearson correlation analysis),以检验变量间的相关性显著程度,为了进一步揭示植物群落多样性与环境因子之间的多维空间关系,本研究以物种丰富度及三种 alpha 多样性指数为响应变量,以地形因子(ALT、SLO、ASP)、土壤养分(碳、氮、磷)及其化学计量比为解释变量进行了主成分分析(PCA)并筛选驱动多样性变化的关键生态因子。所有统计图表均使用 Origin 2021 软件绘制,线性回归模型用于拟合环境梯度与多样性指数的变化趋势。

表 2 坡度、坡向因子赋值

Table 2 Assignment of slope and aspect factors

坡向 Aspect	阳坡 Sunny slope	半阳坡 Semi-sunny slope	半阴坡 Semi-shady slope	阴坡 Shady slope
坡向因子赋值 Assignment of slope direction factor	1	2	3	4
坡度 Slope gradient	$\leq 5^\circ$	$6^\circ \sim 15^\circ$	$16^\circ \sim 25^\circ$	$26^\circ \sim 35^\circ$
坡度因子赋值 Slope factor assignment	1	2	3	4

物种重要值(V):

$$V = (C_r + F_r + H_r) / 3 \quad (1)$$

物种丰富度指数(S):

$$S = \text{出现在样方内物种数} \quad (2)$$

香农-维纳多样性指数(H'):

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (3)$$

辛普森指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (4)$$

皮洛均匀度指数(J):

$$J = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i / \ln S \quad (5)$$

式中: V 为物种重要值(Importance value); C_r , F_r , H_r 分别为某物种的相对盖度、相对频度和相对高度; S 为样方内的物种总数(Species richness); H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数; D 为 Simpson 指数; J 为 Pielou 均匀度指数; P_i 为第 i 个物种的相对多度, $P_i = N_i / N$, 其中, N 为样方中所有物种的个体总数, N_i 为第 i 个物种的个体数。

属及以上的科包括菊科(Asteraceae, 37 属)、禾本科(Poaceae, 34 属)、豆科(Fabaceae, 19 属)及十字花科(Brassicaceae, 10 属)。若以含种数划分,含种数超过 20 种的大型科(Large families)同样为菊科(64 种)、禾本科(53 种)和豆科(36 种),这三大科构成了该区域草地植被的骨架。

含种数在 10-20 种之间的中型科(Medium families)共有 6 个,分别为十字花科(Brassicaceae, 18 种)、蔷薇科(Rosaceae, 18 种)、藜科(Chenopodiaceae, 15 种)、蓼科(Polygonaceae, 14 种)、茄科(Solanaceae, 12 种)和百合科(Liliaceae, 11 种)。其余 44 科均为含种数小于 10 种的小型科或单种科。值得注意的是,上述 9 个大型及中型科虽仅占总科数的 17%,却囊括了 241 个物种,占调查总物种数的 67.6%。这种少数科包含多数种的现象,反映了永登县草地植物区系具有典型的温带半干旱区植被特征,以耐旱、耐寒的菊科、禾本科和豆科植物为演化主体。

2 结果与分析

2.1 永登县草本植物群落物种组成特征

本研究在兰州市永登县调查区域内共记录野生草本植物 53 科 197 属 356 种。其中,蕨类植物仅 4 种,被子植物占绝对优势。植物区系分析表明,该区域物种组成表现出明显的“优势科集中”现象(表 3)。从科的种属数量来看,优势科特征显著。含 10

表 3 兰州市永登县野生草本植物科属组成表

Table 3 List of family and genus composition of wild herbaceous plants in Yongdeng county, Lanzhou city

类别(科) Category (Family)	属 Genus	种 Species
菊科 Asteraceae	37	64
禾本科 Poaceae	34	53
豆科 Fabaceae	19	36
十字花科 Brassicaceae	10	18
其他 Others	<10	<20
所有物种 All Species	197	356

2.2 永登县不同草地类型下优势科的分布格局

为进一步探究优势植物在不同生境下的适应性,本研究分析了四大优势科(菊科、禾本科、豆科、十字花科)在温性草原、温性荒漠草原、山地草甸及栽培草地中的分布情况(图 2)。结果显示,温性草原

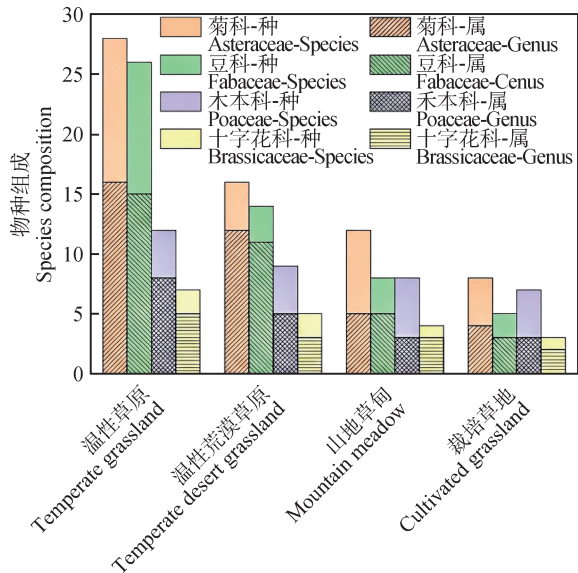


图 2 不同草地类型重要科属物种组成

Fig. 2 Species composition of important families, genera, and species for different grassland types

拥有最高的物种丰富度,四大优势科在此生境下的属、种数量均达到峰值,其中菊科和禾本科表现尤为突出,说明该生境的水热条件最适宜这类植物的物种分化与共存。温性荒漠草原次之,但其禾本科植物比例相对较高,反映了禾本科植物较强的耐旱性。栽培草地的物种多样性最低,各科的属种数量均显著减少,这可能与人为干扰强烈、生境单一化有关。总体而言,菊科植物在所有草地类型中均保持了最高的物种丰富度,显示出该科植物在该区域极强的生态适应能力和竞争优势。

2.3 典型样地优势种组成及重要值分析

为明确永登县草本植物群落的优势种群特征,本研究选取涵盖不同草地类型的 10 个典型样地,对各样地重要值排名前三的物种进行定量分析(表 4)。结果表明,优势物种在生境分布广度和群落地位上差异显著:长芒草(*Stipa bungeana*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)和赖草(*Leymus secalinus*)表现出极强的生态适应性,在四种草地类型中均有分布,而砂韭(*Allium bidentatum*)和芨芨草(*Neotrinia splendens*)主要分布于除栽培草地外的自然生

表 4 兰州市永登县不同草地类型典型草本植物重要值分析

Table 4 Analysis of the importance value of typical herbaceous plants for different grassland types in Yongdeng county, Lanzhou city

区域	植物名称	拉丁名	相对密度	相对盖度	相对高度	重要值
Region	Plant name	Latin name	Relative density	Relative cover	Relative height	Importance value
样地 18	赖草	<i>Leymus secalinus</i>	0.251	0.314	0.253	0.272
Plot 18	茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	0.225	0.285	0.138	0.311
	砂韭	<i>Allium bidentatum</i>	0.562	0.399	0.403	0.454
样地 32	小花棘豆	<i>Oxytropis glabra</i>	0.191	0.268	0.206	0.221
Plot 32	芨芨草	<i>Neotrinia splendens</i>	0.231	0.191	0.326	0.249
	稗子	<i>Echinochloa crus-galli</i>	0.127	0.195	0.458	0.261
样地 48	虱子草	<i>Tragus berteronianus</i>	0.428	0.333	0.169	0.310
Plot 48	小白蒿	<i>Artemisia frigida</i>	0.514	0.555	0.450	0.386
	砂韭	<i>Allium bidentatum</i>	0.304	0.176	0.292	0.257
样地 55	茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	0.532	0.466	0.363	0.475
Plot 55	长芒草	<i>Stipa bungeana.</i>	0.466	0.489	0.354	0.436
	赖草	<i>Leymus secalinus</i>	0.458	0.285	0.306	0.349
样地 58	赖草	<i>Leymus secalinus</i>	0.782	0.341	0.248	0.457
Plot 58	中亚紫菀	<i>Astrothamnus centralasiaticus</i>	0.392	0.459	0.334	0.395
	茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	0.259	0.362	0.452	0.357
样地 66	长芒草	<i>Stipa bungeana</i>	0.275	0.315	0.224	0.271
Plot 66	白颖苔草	<i>Carex duriuscula</i>	0.448	0.375	0.248	0.323
	赖草	<i>Leymus secalinus</i>	0.345	0.364	0.654	0.454
样地 67	扁穗冰草	<i>Agropyron cristatum</i>	0.224	0.363	0.166	0.251
Plot 67	鬼箭锦鸡儿	<i>Caragana jubata</i>	0.247	0.451	0.254	0.317
	长芒草	<i>Stipa bungeana</i>	0.591	0.271	0.262	0.374
样地 68	长芒草	<i>Stipa bungeana</i>	0.541	0.421	0.443	0.468
Plot 68	冷蒿	<i>Artemisia frigida</i>	0.312	0.275	0.331	0.306
	糙叶黄芪	<i>Astragalus scaberrimus</i>	0.451	0.204	0.258	0.284
样地 79	芨芨草	<i>Neotrinia splendens</i>	0.721	0.259	0.231	0.421
Plot 79	赖草	<i>Leymus secalinus</i>	0.349	0.412	0.275	0.345
	茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	0.259	0.312	0.401	0.324
样地 80	砂韭	<i>Allium bidentatum</i>	0.358	0.285	0.266	0.303
Plot 80	芨芨草	<i>Neotrinia splendens</i>	0.509	0.412	0.375	0.432
	茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	0.354	0.242	0.406	0.334

境中;相比之下,温性草原优势种组成最为丰富,涵盖小花棘豆等多种植物,反映了该生境较高的多样性水平。进一步分析发现,部分第一优势种的重要值超过0.400,显示出绝对的群落统治力,其中茵陈蒿在样地55(0.475)、长芒草在样地68(0.468)、赖草在样地58(0.457)以及砂韭和芨芨草在特定样地中均表现出极高的优势度。综合分布广度与数量特征可知,长芒草、赖草、砂韭和芨芨草不仅分布广泛,且在局部生境中能形成显著的优势群落,是该区域草地生态系统的核心建群种。

2.4 alpha多样性指数随海拔梯度的变化特征

基于线性回归模型(Linear regression model)的分析表明,四种草地类型下的物种多样性指数对海拔梯度的响应模式存在显著差异(图3)。温性草原与栽培草地表现出截然相反的趋势:温性草原的Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数随

海拔升高呈极显著负相关($P < 0.001$, $R^2 \geq 0.50$), Simpson指数则呈上升趋势,暗示随着海拔增加,优势种的统治地位增强而群落均匀度下降;反之,栽培草地的Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数随海拔升高显著增加($P < 0.001$, $R^2 > 0.60$), Simpson指数显著降低,表明高海拔区域的人工群落结构更趋复杂且均匀。

相比之下,温性荒漠草原的变化模式更为复杂,其Shannon-Wiener指数随海拔升高显著下降($P < 0.001$),而Simpson指数和Pielou均匀度指数却表现为显著上升趋势($P < 0.01$),这种不一致性可能暗示了该生境下物种丰富度的急剧减少对多样性的负向贡献超过了均匀度改善的正向影响。山地草甸的三个多样性指数虽随海拔升高均呈现出上升趋势,但统计检验显示这种线性关系并未达到显著水平,这可能与该生境下的样点数量有限或环境因子存在的非线性影响有关。

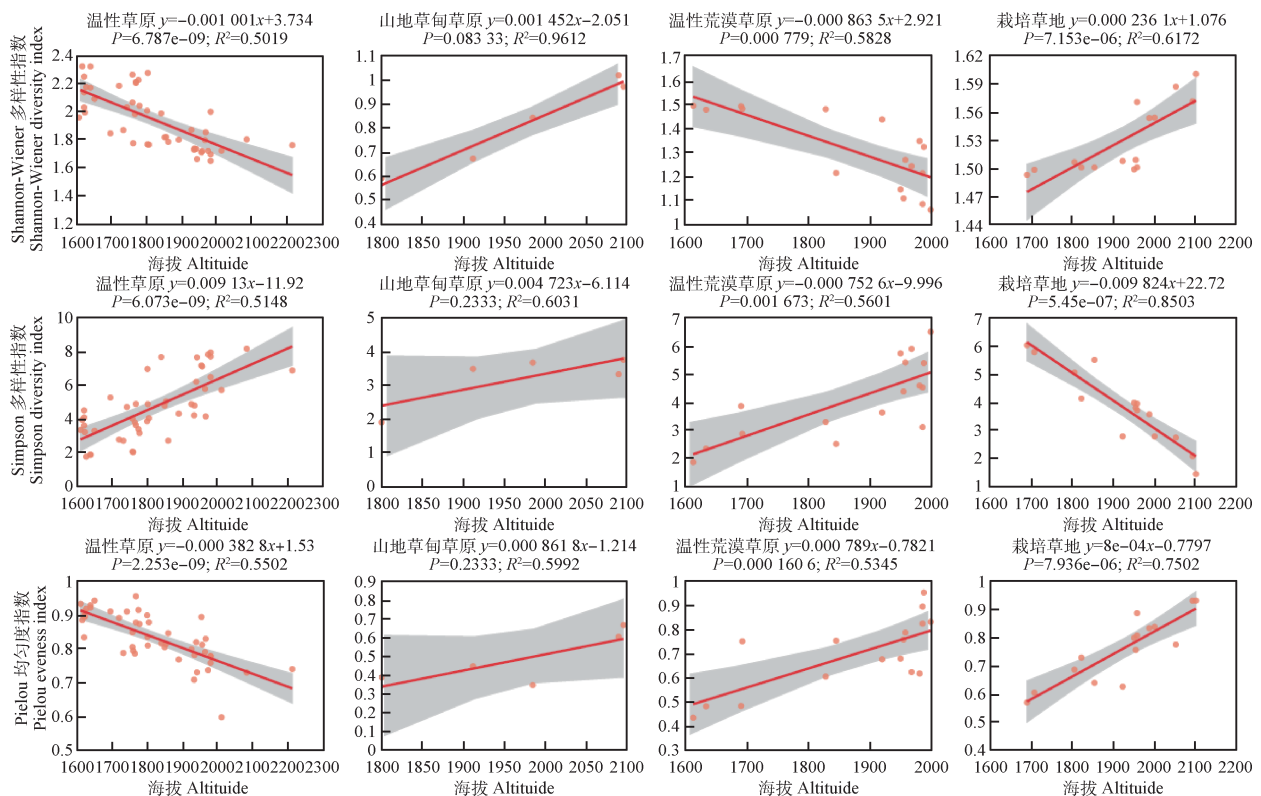


图3 永登县不同草地类型草本植物多样性指数与海拔因子的线性关系

Fig. 3 Fitting curve of herbaceous plant diversity index and elevation factor for different grassland types in Yongdeng county

2.4 不同草地类型草本植物物种丰富度与坡度坡向的关系

基于野外调查数据,本研究对四种不同草地类型的草本植物物种丰富度与坡度及坡向进行了非线性拟合分析(图4,图5)。结果表明,由于生境异

质性,不同草地类型的物种丰富度对地形因子的响应存在显著差异。

物种丰富度随坡度的变化主要呈现三种趋势(图4)。温性草原的物种丰富度随坡度增加呈现显著的上升趋势;相反,山地草甸草原的物种丰富度

随坡度增加表现出下降趋势。温性荒漠草原与栽培草地的变化趋势相似,整体呈现微弱的“U”型波动,即在低坡度和高坡度区丰富度相对较高,而在中等坡度区有所降低。

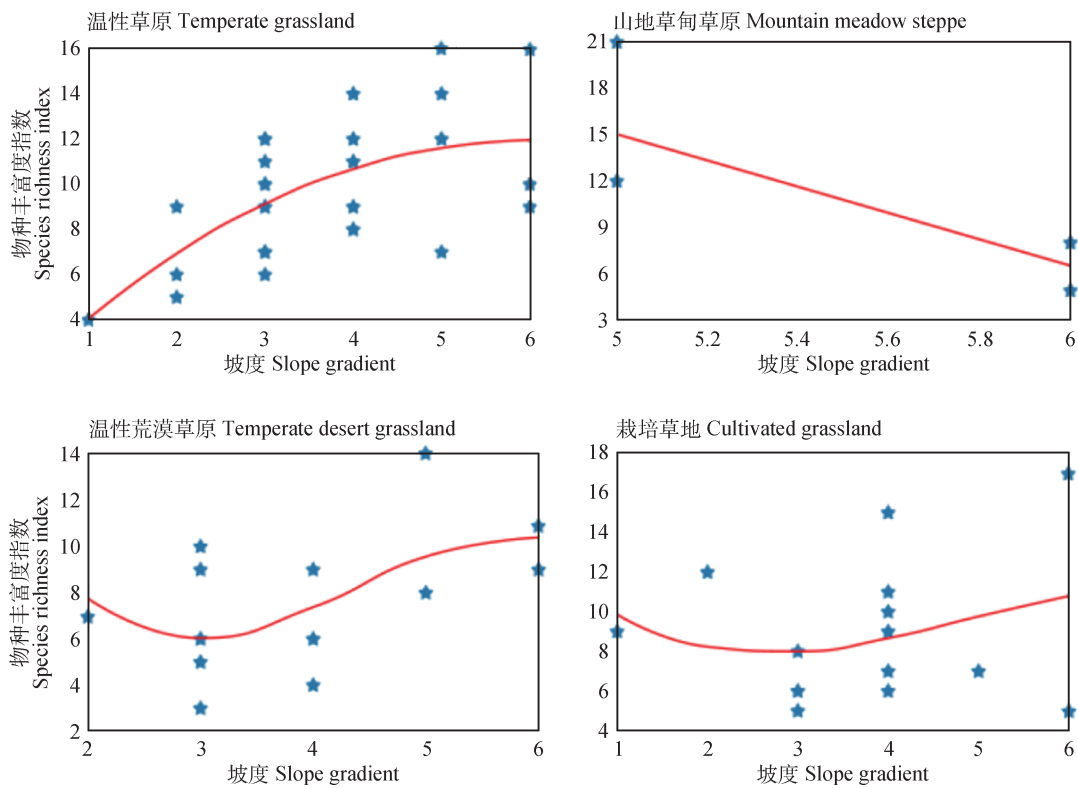


图 4 永登县不同草地类型草本植物丰富度与坡度拟合曲线图

Fig. 4 Fitting curve of herbaceous plant richness and slope gradient for different grassland types in Yongdeng county

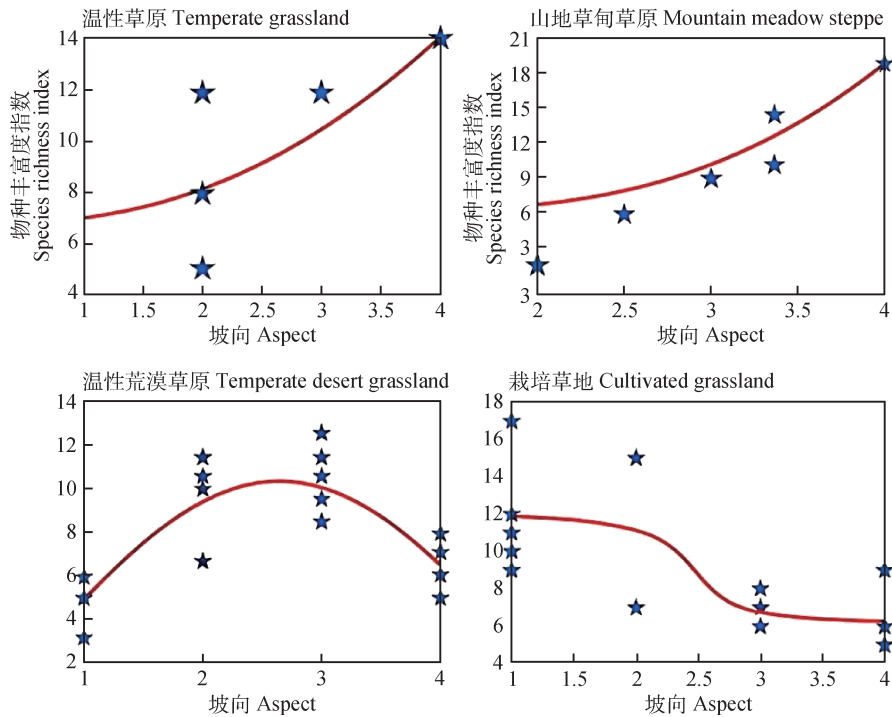


图 5 永登县不同草地类型草本植物丰富度与坡向拟合曲线图

Fig. 5 Fitting curve of herbaceous plant richness and aspect for different grassland types in Yongdeng county

坡向对物种丰富度的影响更为复杂。温性草原与山地草甸草原表现出一致的规律,即随着坡向指数的增大(由阳坡向阴坡过渡),物种丰富度呈现上升趋势,表明阴坡生境更有利于这两类草地物种的生存。温性荒漠草原则呈现出典型的单峰曲线(Unimodal pattern),在坡向指数为2~3的半阴/半阳坡生境下物种最为丰富。栽培草地则表现出与上述类型截然不同的下降趋势,随着坡向指数增大丰富度显著降低,这可能与其受到较强的人为干扰及特定的种植管理模式有关。

2.5 不同草地类型物种丰富度与土壤养分的关系

如图6所示,线性拟合分析结果表明土壤养分对物种丰富度的影响具有显著的生境特异性。土壤有

机碳对四种草地类型的物种丰富度均表现出一致的显著促进作用($P < 0.05$),二者呈正相关关系,其中温性荒漠草原的解释率最高($R^2 = 0.86$),表明有机碳是该区域的关键限制因子。与有机碳的普遍促进作用相反,土壤全氮和全磷主要表现为抑制效应或负相关趋势。具体而言,温性草原、山地草甸草原和栽培草地的物种丰富度随土壤全氮含量的增加显著降低($P < 0.05$);同时,温性草原和栽培草地的物种丰富度与土壤全磷也呈极显著负相关($P < 0.001$)。值得注意的是,温性荒漠草原对氮、磷变化的响应相对迟钝,未检测到显著的线性相关关系。综上所述,在该研究区域内,土壤有机碳有利于物种多样性的维持,而高含量的氮、磷则对部分草地群落表现出明显的竞争排斥或抑制效应,从而降低群落多样性。

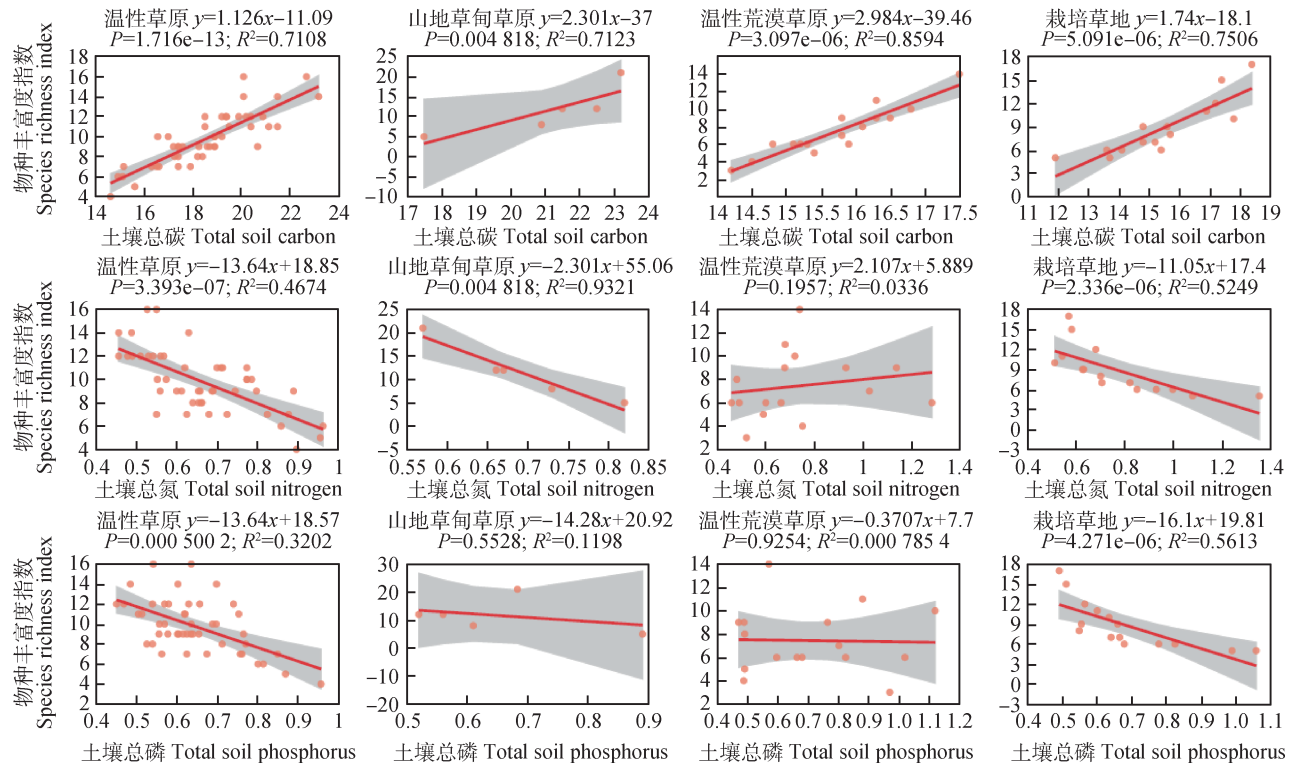


图6 永登县不同草地类型丰富度指数与土壤因子拟合曲线图

Fig. 6 Fitting curves of richness and the contents of soil nitrogen, phosphorus and potassium for different grassland types in Yongdeng county

2.6 不同草地类型丰富度与环境因子的相关性分析

Pearson 相关性分析表明(图7),土壤养分是驱动不同草地类型物种多样性变化的核心因子,但其驱动机制存在显著的生境异质性。整体上,土壤总碳(STC)对物种丰富度表现出普适的促进作用,在四种草地类型中均呈显著正相关;相比之下,土壤总氮(STN)和全磷(STP)主要起负向调节作用。

具体而言,温性草原(图7a)和栽培草地(图7d)的物种丰富度与全氮、全磷均呈极显著负相关($P < 0.001$),其中栽培草地受人为管理影响,多样性与养分的线性响应最为强烈(R 值均超0.90)。山地草甸草原(图7b)则呈现出最为极端的养分耦合机制,其物种丰富度与土壤有机碳呈极强正相关($R = 0.97$),与全氮呈极强负相关($R = -0.97$),且碳氮之间存在完全的负权衡关系($R = -1.00$),暗示了

高寒生境下特殊的资源竞争与循环特征。

除土壤因子外,地形因子对群落结构的间接调控作用同样显著。在温性草原中,海拔(ALT)与Shannon及Simpson指数均呈显著负相关($R=-0.77$),表明海拔升高限制了群落多样性;坡向则通过影响水热条件,与土壤氮磷含量表现出显著的负相关关系。温性荒漠草原(图7c)则是唯一的例外,其环境解释力

度相对较弱,物种丰富度仅受有机碳显著驱动($R=0.57$),与氮、磷无显著关联,印证了有机碳是该脆弱生境的首要限制因子。综上所述,本研究区域内土壤有机碳的积累有利于维持物种多样性,而过高的氮磷含量往往通过竞争排斥机制抑制群落多样性;地形因子则主要通过重塑生境的水热及养分分布格局,间接驱动植物群落的演替与分异。

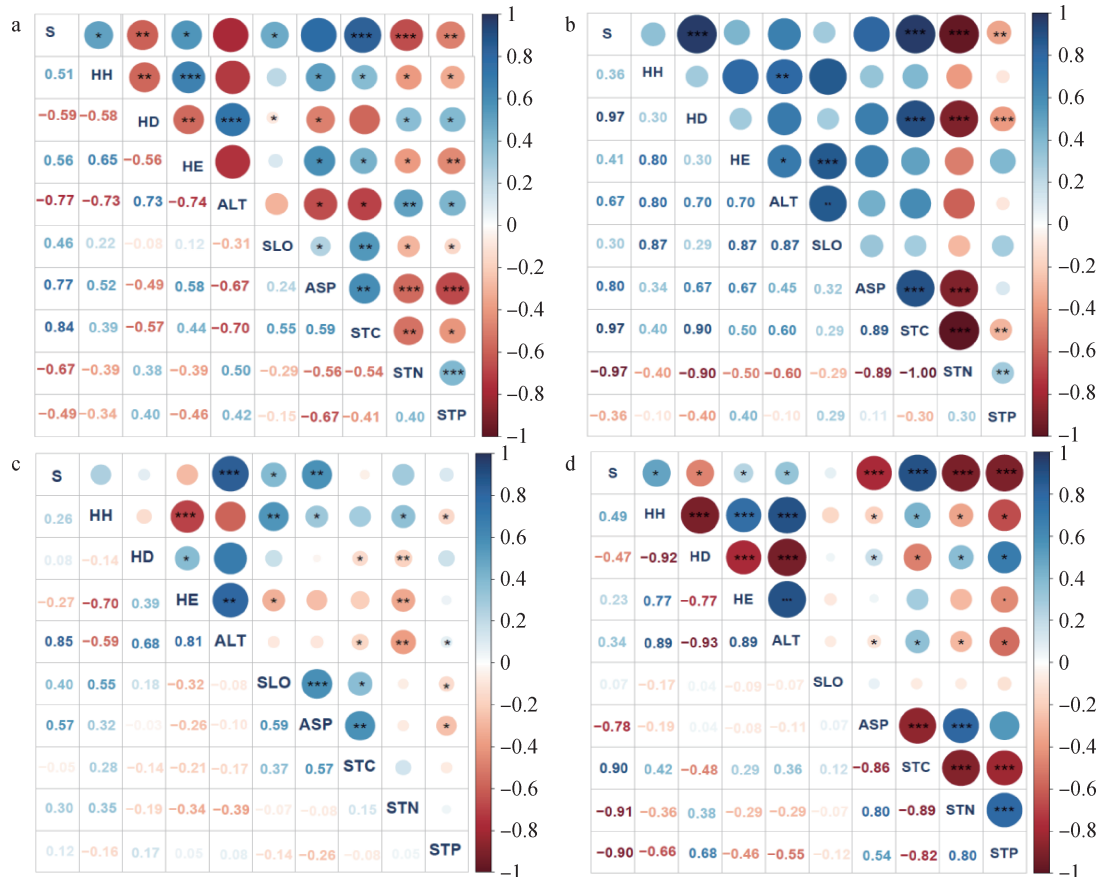


图7 永登县草本植物丰富度指数与环境因子相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between the richness index of herbaceous plants and environmental factors in Yongdeng county

注:图a为温性草原,图b为山地草甸草原,图c为温性荒漠草原,图d为栽培草地。* $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$

Note: Figure a, temperate grassland, Figure b, mountain meadow grassland, Figure c, temperate desert grassland, and Figure d, cultivated grassland

2.7 不同草地类型丰富度与环境因子主成分分析

主成分分析(PCA)结果显示,前两个排序轴累计解释了总方差变异的55.2%,其中第一主成分(PC1)解释量为39.1%,能够有效反映驱动群落特征变化的主要环境梯度(图8)。PC1轴主要揭示了“土壤碳-氮/磷”的养分权衡及地形梯度的影响:物种丰富度(S)与土壤有机碳(STC)、C:P、C:N比值及地形因子(坡度、坡向)在PC1正半轴形成紧密簇群,向量方向高度重合,表明坡度和坡向通过促进土壤有机碳积累显著提升了物种丰富度。相反,辛普森指数(HD)、土壤全氮(STN)、全磷(STP)及海

拔(ALT)主要分布于PC1负半轴;其中海拔与全磷的向量趋同并指向辛普森指数,说明随着海拔升高,磷含量的增加主要驱动了群落优势度的变化。此外,香农-维纳指数(HH)与Pielou均匀度指数(HE)在第四象限的向量夹角极小,证实了群落均匀度是决定香农多样性的核心组分。

在样点空间分布上,不同草地类型沿PC1轴表现出显著的分异规律。温性荒漠草原(绿色点)集中分布于PC1负半轴,对应高氮、高磷及低碳的生境特征;而山地草甸草原(红色点)和部分温性草原(黑色点)则主要占据PC1正半轴,与高土壤有机碳

及高物种丰富度区域相吻合。这一分布格局进一步印证了土壤碳、氮、磷化学计量特征及其与地形的耦合作用,是驱动该区域不同草地类型物种多样性分异的关键生态过程。

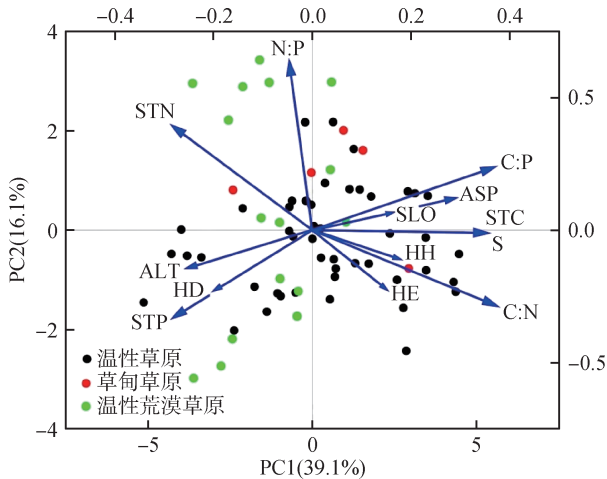


图8 永登县草本植物丰富度指数与环境因子主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of the richness index of herbaceous plants and environmental factors in Yongdeng county

3 讨论

3.1 物种组成与群落分布特征

本研究共调查记录野生草本植物 53 科 197 属 356 种,优势科主要集中在菊科、禾本科及豆科。其中,长芒草、赖草、芨芨草和砂韭等物种在调查样地中分布广泛且重要值较高,表明这些物种对永登县干旱及石质山地环境具有极强的适应性^[21]。与王德国^[22]的调查结果相比,本次记录的科属种数量偏少,这可能归因于调查范围主要集中在特定样地,未能完全覆盖连城自然保护区全境,致使部分珍稀草本植物未被收录。此外,研究发现草本植物群落随海拔梯度的变化呈现出明显的类型更替,不同群落类型间既有显著的生境界限,又存在过渡区的物种交叉重叠,这一结果印证了崔茂欢^[23]关于群落垂直分布格局的研究结论。

3.2 物种多样性对海拔梯度的响应

研究区内物种多样性指数变化范围较大(丰富度 2~21),但整体水平偏低(Shannon-Wiener 指数 0.49~2.37),反映出该地区群落结构相对简单,物种分布不均匀,这与蔡万旭等^[24-25]在连城自然保护区的结论一致。海拔被证实是决定植物群落物种

组成及分布的首要环境因子^[27-31],其通过改变局部水热条件进而影响植物的分布格局^[32]。本研究中,不同草地类型的 alpha 多样性指数与海拔均呈现显著的线性相关,但响应模式存在差异:温性草原和温性荒漠草原的多样性随海拔变化规律一致;山地草甸草原的多样性随海拔升高呈不显著上升趋势,这可能与高海拔区域出现了特有的耐寒适应性植物有关;而栽培草地则表现出相反的趋势,这主要受人为种植结构单一性的干扰影响。总体而言,各多样性指数间的变化规律相似,揭示了调查区内野生草本植物具有明显的垂直地带性分布特征^[26]。

3.3 地形因子与土壤养分的驱动作用

除海拔外,坡度、坡向及土壤养分也是影响群落结构的重要筛选因子。在坡度方面,不同草地类型的丰富度指数拟合曲线呈单峰增长趋势,即在缓坡生境下丰富度达到峰值^[33]。在坡向方面,阴坡的物种丰富度显著高于阳坡,这主要是由于半干旱地区阴坡较好的水分保持能力更适宜草本植物生存,而阳坡强辐射和高温加剧了水分胁迫。土壤因子分析表明,除山地草甸草原外,其余三种草地类型的物种丰富度与土壤有机碳呈正相关,而与全氮及全磷含量呈负相关。这说明土壤有机质的积累有利于物种共存,而过高的氮磷含量可能诱发优势种的竞争排斥作用,从而降低群落多样性;同时,土壤氮、磷含量之间表现出的正相关性,反映了该区域土壤养分循环的耦合特征。

3.4 资源利用现状与研究展望

调查表明,永登县野生草本植物资源丰富,且多为生态幅宽、适应性强的广布种^[35],非常适宜在西北半干旱地区进行生态修复与推广。然而,目前区域内野生草本资源多处于自然生长状态,利用方式仍以传统的家畜自由放牧为主^[35],缺乏深层次的开发与保护。需指出的是,本研究受限于调查季节、时间窗口及微地形差异,加之草本植物个体小、分布广且种群密度不均,统计结果可能存在一定局限性。因此,未来亟需加强对该区域野生草本植物资源的系统性长期监测与科学保护研究,进一步阐明其资源分布的时空动态特征,为实现区域生态可持续管理提供理论依据^[36]。

4 结论

4.1 植物资源与群落多样性特征

永登县野生草本植物资源较为丰富,共记录53科197属356种,以菊科、禾本科和豆科为主,呈现典型的温带半干旱区系特征。长芒草、芨芨草等优势种对于旱生境适应性极强。然而,群落结构整体简单且分布不均,多样性指数变幅大但均值偏低,表明生境异质性高而稳定性弱。不同草地类型差异显著,温性草原多样性最高,而山地草甸草原受高寒气候限制,多样性显著偏低。目前该区域优质牧草资源利用方式单一,亟待挖掘其在生态修复与种质资源保护中的潜力。

4.2 环境驱动机制与保护策略

海拔是决定群落分布格局的首要非生物因子,呈显著线性控制作用;坡度与坡向则通过调节水热平衡表现为非线性影响。土壤养分驱动机制方面,主成分分析揭示了“土壤-地形”的多维耦合作用:土壤有机碳是物种丰富度的核心促进因子,有利于物种共存;而全氮和全磷主要表现为负向调控,高含量可能引发竞争排斥从而降低多样性。综上,该区域生态系统受海拔与土壤化学计量特征共同驱动,未来管理应基于生境特异性,重点关注温性草原的碳库保护及其他类型的微地形与养分协同管理。

参考文献

- [1] 马克平,刘灿然,于顺利. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅲ. 几种类型森林群落的种-多度关系研究[J]. 生态学报,1997,17(6):584-592
MA K P, LIU C R, YU S L. Studies on plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing Ⅲ. Species-abundance relation of several types of forest communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(6): 584-592
- [2] 王根绪,程国栋,徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报,1999,14(2):109-116
WANG G X, CHENG G D, XU Z M. Utilization of water resources and its ecological environmental problems in arid area of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(2): 109-116
- [3] 张西,叶茂,陈维龙,等. 地形对阿尔泰山草地植物群落物种多样性的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(7):57-71
ZHANG X, YE M, CHEN W L, et al. Effects of topography on species diversity of grassland plant communities in Altai Mountains[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(7): 57-71
- [4] 连佳丽,陈婧,杨雪琴,等[J]. 荒漠草原植物多样性和微生物多样性对降水变化的响应. 生物多样性,2024,32(6):131-144
LIAN J L, CHEN J, YANG X Q, et al. Responses of plant and microbial diversity to precipitation changes in desert steppe[J]. Biodiversity Science, 2024, 32(6): 131-144
- [5] 李阳春,吴天德,邵新庆,等. 甘肃野生草坪及地被植物种质资源的调查[J]. 草原与草坪,2001(3):26-30
LI Y C, WU T D, SHAO X Q, et al. Investigation on germplasm resources of wild turf and ground cover plants in Gansu[J]. Grassland and Turf, 2001(3): 26-30
- [6] 马良杰,陈本建. 兰州南北两山草本植物种质资源调查与区系分析[J]. 青海草业,2011,20(2):45-53,56
MA L J, CHEN B J. Investigation and flora analysis of herbaceous plant germplasm resources in North and South Mountains of Lanzhou[J]. Qinghai Prataculture, 2011, 20(2): 45-53, 56
- [7] 石善斌,席正英. 兰州市南北两山地被植物调查[J]. 甘肃农业科技,2015,(10):12-14
SHI S B, XI Z Y. Investigation of ground cover plants in North and South Mountains of Lanzhou[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2015(10): 12-14
- [8] 王玲,尚红喜,李景文,等. 甘肃连城国家级自然保护区的植物组成及种子植物区系分析[J]. 西部林业科学,2006,(2):64-69
WANG L, SHANG H X, LI J W, et al. Plant composition and seed plant flora analysis of Liancheng National Nature Reserve in Gansu[J]. Journal of West China Forestry Science, 2006, (2): 64-69
- [9] 许金凤,马红梅,张健全,等. 兰州南北两山种子植物区系[J]. 草业科学,2016,33(3):408-423
XU J F, MA H M, ZHANG J Q, et al. Seed plant flora of North and South Mountains in Lanzhou[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(3): 408-423
- [10] 秦冬梅,雍东鹤,于坚,等. 兰州地区野生观赏草资源调查及园林应用初探[J]. 农业科技与信息,2022,(1):56-59
QIN D M, YONG D H, YU J, et al. Investigation on wild ornamental grass resources and their application in landscape gardening in Lanzhou area[J]. Agricultural Science and Technology and Information, 2022, (1): 56-59
- [11] 鲁滨. 甘肃省永登县药用植物资源调查及保护对策研究[D]. 兰州:西北师范大学,2013:14-15
LU B. Investigation on medicinal plant resources and protection countermeasures in Yongdeng County [D]. Lanzhou: North-west Normal University, 2013: 14-15
- [12] 赵凡,钟欣艺,谢平畅,等. 不同植被维护措施对三星堆遗址城墙草本植物群落物种多样性与生物量的影响[J]. 生态学报,2024(19):1-10
ZHAO F, ZHONG X Y, XIE P C, et al. Effects of different vegetation maintenance measures on species diversity and biomass of herbaceous plant communities on the city wall of Sanxingdui Ruins[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, (19): 1-10
- [13] 中国植物学会. 中国植物学史[D]. 北京:科学出版社,1994:3
CHINESE BOTANICAL SOCIETY. History of Chinese Botany[D]. Beijing: Science Press, 1994: 3
- [14] 卫玺玺,晁鑫艳,郑景明,等. 贺兰山东、西侧典型植物群落物种多样性差异及其影响因子[J]. 生态环境学报,2024,33(4):520-530
WEI X X, CHAO X Y, ZHENG J M, et al. Differences in species diversity of typical plant communities on the east and west sides of Helan Mountain and their influencing factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(4): 520-530
- [15] 冷流江,张艳,赵廷宁,等. 松散堆积体边坡植被分布特征及其环境因子解析[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(12):1595-1602
LENG L J, ZHANG Y, ZHAO T N, et al. Distribution characteristics of vegetation on loose accumulation slopes and analysis of environmental factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(12): 1595-1602

- [16] 葛厚尚. 徐州地区维管植物资源调查及主要森林植被类型研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013:8-9
GE H S. Investigation of vascular plant resources and study on main forest vegetation types in Xuzhou area[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013:8-9
- [17] YAN Y, ZHANG C Y, WANG Y X, et al. Drivers of seedling survival in a temperate forest and their relative importance at three stages of succession[J]. Ecology and Evolution, 2015, 5(19):4215-4226
- [18] 杨玉凤, 武利玉, 张晓玮, 等. 兰州南北两山侧柏人工林下草本层植物多样性[J]. 草原与草坪, 2023, 43(2):51-58
YANG Y F, WU L Y, ZHANG X W, et al. Plant diversity of herb layer under *Platycladus orientalis* plantation in North and South Mountains of Lanzhou[J]. Grassland and Turf, 2023, 43(2):51-58
- [19] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3):162-168
MA K P. Measurement of community diversity I. Measurement of α diversity (Part 1)[J]. Biodiversity Science, 1994, 2(3):162-168
- [20] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4):231-239
MA K P, LIU Y M. Measurement of community diversity I. Measurement of α diversity (Part 2)[J]. Biodiversity Science, 1994, 2(4):231-239
- [21] 张一丹. 山东省蒙山区域野生草本植物资源调查与评价[D]. 秦皇岛:河北科技师范学院, 2023:34-35
ZHANG Y D. Investigation and evaluation of wild herbaceous plant resources in Mengshan area, Shandong Province [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2023:34-35
- [22] 王德国. 甘肃连城国家级自然保护区植物群落及保护研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008:39
WANG D G. Study on plant community and protection of Liancheng National Nature Reserve in Gansu[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008:39
- [23] 崔茂欢, 李亚楠, 杨勋, 等. 南涧凤凰山州级自然保护区植物群落多样性调查研究[J]. 林业调查规划, 2024, 49(4):51-57
CUI M H, LI Y N, YANG X, et al. Investigation on plant community diversity in Nanjian Fenghuangshan Prefecture-level Nature Reserve [J]. Forest Inventory and Planning, 2024, 49(4):51-57
- [24] 蔡万旭, 单立山, 瞿学方, 等. 甘肃连城国家级自然保护区林地现状分析[J]. 林业调查规划, 2020, 45(6):53-58
CAI W X, SHAN L S, QU X F, et al. Analysis of forest land status in Liancheng National Nature Reserve, Gansu [J]. Forest Inventory and Planning, 2020, 45(6):53-58
- [25] 林海丽, 袁柯伟, 梁志慧, 等. 中亚热带典型岩溶森林植物多样性与环境因子关系的研究[J]. 广西植物, 2024, 44(3):428-438
LIN H L, YUAN K W, LIANG Z H, et al. Relationship between plant diversity and environmental factors in typical Karst forests of central subtropical China [J]. Guangxi flora, 2024, 44(3):428-438
- [26] 林阳, 李时轩, 周伟龙, 等. 百山祖国家公园海拔梯度上木本植物群落 α 和 β 多样性[J]. 生态学报, 2024, (17):1-13
LIN Y, LI S X, ZHOU W L, et al. α and β diversity of woody plant communities along elevational gradient in Baishanzu National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, (17):1-13
- [27] 郭昊, 赵厚本, 高亿波, 等. 南岭中段森林优势树种及其生态位随海拔梯度变化特征[J]. 植物科学学报, 2024, 42(5):582-594
GUO H, ZHAO H B, GAO Y B, et al. Characteristics of dominant tree species and their niches along elevational gradient in the middle section of Nanling Mountains [J]. Plant Science Journal, 2024, 42(5):582-594
- [28] 张菊花, 张旭, 杨光能, 等. 雷公山森林群落结构组成及其随海拔梯度的变化[J]. 贵州林业科技, 2023, 51(4):15-21
ZHANG J H, ZHANG X, YANG G N, et al. Composition of forest community structure and its variation along altitudinal gradient in Leigong Mountain [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2023, 51(4):15-21
- [29] 张谦, 陈俊强, 陈海燕, 等. 不同海拔引种地3种芍药科植物的光合特性及速率的影响因子分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(2):26-34
ZHANG Q, CHEN J Q, CHEN H Y, et al. Factor analysis of photosynthetic characteristics and rates of 3 *Paeonia* species introduced at different altitudes [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2025, 45(2):26-34
- [30] 李文涛, 王小鹏, 张荣红, 等. 兴隆山保护区烈香杜鹃分布现状及不同海拔梯度株丛特征[J]. 林业科技通讯, 2023(10):64-66
LI W T, WANG X P, ZHANG R H, et al. Distribution status and bush characteristics of *Rhododendron anthopogonoides* at different altitude gradients in Xinglongshan Reserve [J]. Forestry Science and Technology Communication, 2023(10):64-66
- [31] 李小龙, 曹文侠, 张晓燕, 等. 祁连山4种杜鹃在不同海拔梯度上的株丛特征[J]. 草原与草坪, 2017, 37(6):57-64
LI X L, CAO W X, ZHANG X Y, et al. Bush characteristics of 4 *Rhododendron* species along different altitude gradients in Qilian Mountains [J]. Grassland and Turf, 2017, 37(6):57-64
- [32] 李文涛, 满自红, 苏腾伟, 等. 甘肃连城国家级自然保护区植被状况及分布规律研究[J]. 特种经济动植物, 2024, 27(8):141-143
LI W T, MAN Z H, SU T W, et al. Study on vegetation status and distribution regularity of Liancheng National Nature Reserve in Gansu [J]. Special Economic Animals and Plants, 2024, 27(8):141-143
- [33] DUAN J H, YANG L, TANG T, et al. Environment and management jointly shape the spatial patterns of plant species diversity of moist grasslands in the mountains of northeastern Yunnan [J]. Plant Diversity, 2024, 46(2):181-189
- [34] 黄宾芯, 石伟, 化晨肖, 等. 尧山野生草本植物资源调查及分析[J]. 林业调查规划, 2023, 48(1):87-91
HUANG B X, SHI W, HUA C X, et al. Investigation and analysis of wild herbaceous plant resources in Yaoshan [J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(1):87-91
- [35] 王金盘, 陈学林, 满自红, 等. 甘肃连城国家级自然保护区药用植物资源多样性及开发利用研究[J]. 北方园艺, 2013, (14):159-163
WANG J P, CHEN X L, MAN Z H, et al. Diversity and exploitation of medicinal plant resources in Liancheng National Nature Reserve, Gansu [J]. Northern Horticulture, 2013, (14):159-163
- [36] 蔡洪丽. 贵阳市中心城区城市林下野生草本花卉物种多样性环境响应及开发利用评价[D]. 贵阳:贵州大学, 2023:59-60
CAI H L. Environmental response of species diversity and evaluation of development and utilization of wild herbaceous flowers under urban forests in central urban area of Guiyang [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023:59-60