

青藏高原退化高寒草甸植被群落与土壤养分变化特征

林伟山¹, 德科加^{1,2*}, 向雪梅¹, 冯廷旭¹, 李菲¹, 魏希杰^{1,2}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016)

摘要:【目的】以三江源区中度退化高寒草甸为研究对象, 分析退化高寒草甸的植物群落特征和土壤养分的动态变化及其差异性, 揭示影响植物群落特征的驱动因子, 为青藏高原退化高寒草甸的科学管理及资源的合理利用提供基础数据。【方法】于2020—2022年的7、8和9月在青海省玉树州退化高寒草甸测定植物的高度、盖度、Patrick指数、Pielous指数、Shannon—Wiener指数和总生物量以及土壤的全氮、铵态氮、硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾含量等指标。对植物和土壤的指标进行单因素分析, 分析植物群落特征与土壤养分之间的相关性, 采用Canoco 5.0软件对植被特征和土壤理化性质进行冗余分析。【结果】高寒草甸植物Patrick指数、Pielous指数和总生物量没有统一的月际动态变化, 但月际间差异显著; 植物功能群生物量表现出增加的月际动态变化, 其变化趋势基本一致(除2022年杂类草); 土壤全氮、铵态氮、硝态氮、速效氮和有机碳含量整体上反映出相似的变化规律, 均在8月达到峰值; 土壤全磷和全钾含量与植物总生物量、高度和Pielous指数呈极显著正相关, 与Patrick指数呈极显著负相关。植物盖度与土壤全氮和有机碳呈极显著正相关; Shannon—Wiener指数和总生物量与土壤硝态氮含量呈显著正相关。【结论】退化草甸植物群落特征和功能群生物量没有统一的变化规律, 整体表现为8月有最大值。土壤养分与植物群落间存在显著正相关, 对植被特征影响最大的土壤因子是土壤有机碳和全氮含量。

关键词: 青藏高原; 高寒草甸; 植被多样性; 土壤养分; 动态变化

中图分类号: S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2025)02-0014-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.002



三江源区位于青海省南部, 它是黄河、长江和澜沧江的源头, 被称为“中华水塔”, 由于其独特的地理位置和资源特点, 对亚洲乃至世界的生态系统保护与环境治理作用巨大^[1]。高寒草甸作为三江源区的主要植被类型, 其分布面积在各植被类型中最大, 约占50%, 为171 662 km²⁻³, 在固碳增汇方面发挥着重要

作用^[4]; 同时, 高寒草甸是青藏高原发展畜牧业生产的物质基础^[5]。近年来, 全球气候变暖、风蚀、水蚀和冻融等自然因素和人为因素的影响, 导致三江源区草地出现了不同程度的退化^[1,6-7]。草地退化导致草地植被盖度降低、物种组成和群落结构发生改变, 造成表土裸漏, 养分流失, 生态系统养分输出远远超过输入, 使得生态系统功能稳定性下降, 生态功能无法正常发挥, 草地不断退化是青藏高原草地正在面临的严重问题^[8-9]。

目前, 关于退化草地的恢复, 国内外学者提出了中度干扰假说、临界阈值和冗余结构等理论, 主要是通过研究生态系统功能, 分析草地退化过程, 探索维持草地生态功能稳定性的策略^[10-12]。高寒草甸退化治理恢复措施主要有: 休牧^[1,13]、围栏封育^[14-15]、人工

收稿日期: 2024-03-11; **修回日期:** 2024-08-14

基金资助: 青海省科技厅重点研发与转化计划项目(2024-NK-137); 青海三江源草地生态系统国家野外科学观测研究站(K9922050)

作者简介: 林伟山(1996-), 男, 藏族, 甘肃天祝人, 博士研究生。E-mail: linws1314@163.com

*通信作者, 研究方向为高寒草甸适应性管理。
E-mail: dekejia1002@163.com

种植^[16-17]、施肥^[18-19]等。对于中度退化高寒草甸而言,施肥对植物初级生产力有积极效应,是三江源区玉树州等地解决牲畜饲草料缺乏的有效手段。施肥可以显著提高植被生产力,增加植被盖度,增加物种多样性;同时,施肥提高土壤养分含量,改善土壤肥力^[18-20]。由于土壤具有滞后性和复杂性,高寒草甸土壤对施肥的响应机制尚不明晰。随着氮沉降加剧,青藏高原草地生态系统由原来的氮(N)限制逐渐转变为磷(P)限制或 N、P 共同限制,草地生态系统的养分循环机制尚不明晰的情况下盲目地施肥(养分添加)会打破生态系统原有的平衡或破坏生态系统的自我调节能力。然而,有关退化高寒草甸植物特征和土壤养分动态的报道较少,关于退化草地的植物多样性和养分变化的持续性观测研究鲜有报道,

因此,在全球气候变暖、过牧、啮齿动物泛滥等多方面因素的干扰下,对退化高寒草甸植物特征和土壤养分的动态变化的持续观测可为后续开展草地生态恢复相关的工作奠定基础。本研究通过持续 3 年观测退化高寒草甸植被群落特征和土壤理化性质的动态

变化,为高寒草甸草地生态系统的健康管理和青藏高原的永续发展提供理论数据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验在三江源生态系统教育部野外科学观测研究站展开,具体地点为青海省玉树州称多县珍秦镇(33°24'30" N, 97°18'00" E),海拔高度为 4 270 m,气候为典型的高原大陆性气候,年平均气温为 -10.3~4.6 °C,年均降水量为 614.1 mm,年度降水主要分布在 6—9 月。该草地类型为矮嵩草(*Kobresia humilis*)和杂类草草甸,草地为中度退化草地^[21],草地主要优势牧草是矮嵩草、异针茅(*Stipa aliena*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)等,伴生植被包括羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等。杂类草和毒草有黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、青藏龙胆(*Gentiana futtereri*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)等。土壤为高山草甸土,土壤 pH 值为 6.92,有机质含量 2.36 g/kg,速效氮含量 14.0 mg/kg,速效磷含量 7.0 mg/kg,速效钾含量 76.5 mg/kg^[22]。

表 1 2020—2022 年试验区的年降水量

Table 1 Annual precipitation in the test area from 2020 to 2022

日期/(年—月)	2020-07	2020-08	2020-09	2021-07	2021-08	2021-09	2022-07	2022-08	2022-09
年降水量/mm	86.6	94.4	142	83.1	137.7	75.1	86.5	80.6	41.6

1.2 样品采集

2020—2022 年的 7、8 和 9 月在上述试验区植物生长季进行取样。在试验区选择地势平坦、植被均匀分布且具有代表性的围栏(每年 10 月至次年 4 月放牧,在植被生长季未放牧)草地作为试验样地,设置 0.5 m×0.5 m 面积的样方进行植被调查并采集植物和土壤样品。植被调查时,记录样方内植物物种的种类、高度和盖度^[23],之后将样方内植物分为莎草科、禾本科、杂类草归类^[24],植被调查后,将地上植被按物种齐平地面刈割,分装进信封,置于阴凉处;地下生物量采用内径 5 cm 土钻采集 0~20 cm 土层土壤样品,将样品装入信封袋,带回实验室后清除碎石、沙砾,使用 0.28 mm 孔径标准土壤筛分离出根系并冲洗风干,将地上生物量和地下生物量放入烘箱在 60 °C、48 h 烘干至恒重,并称质量^[23]。取样 5 次混合为 1 个样品。5 个

重复。

地上植被特征取完样的样方内用土钻法^[25]采集 0~30 cm 土层土壤样品,每个样方用内径 5 cm 的土钻钻取土样 5 次混合为 1 个样品,5 个重复。将土样运回实验室混匀过筛后分为 2 部分:一部分样品保存于 4 °C 保温箱用于测定土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N;另一部分置于阴凉通风处风干后用于测定土壤全氮、全磷、全钾、有机碳含量和速效氮含量^[23]。

1.3 测定指标

参考段成伟^[23]文献,根据植被调查数据,计算重要值和群落结构特征指数。群落多样性指数(Shannon—Wiener 指数, H')、丰富度指数(Patrick 指数, $Pa=S$)和均匀度指数(Pielous 指数, J')公式:

$$\text{相对重要值: } P_i = \frac{c_i/C + h_i/H + n_i/N}{3} \times 100\%$$

Shannon—Wiener 多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i;$$

Pielous 均匀度指数: $J' = H' / \ln S$;

Patrick 丰富度指数: $Pa = S$ 。

式中, P_i 为第 i 种植物的重要值; n_i 为第 i 种植物个体数; c_i 为第 i 种植物盖度; h_i 为第 i 种植物高度; N 为样方内总个体数; C 为样方总盖度; H 为样方内植物高度; H' 为多样性指数; J' 为均匀度指数; S 为样地物种数。

土壤理化性质的测定方法^[21,26]: 全氮(TN)用凯氏定氮法测定; 土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾容量—外加加热法测定; 全磷(FP)用钼锑抗比色法测定; 土壤 NO_3^- -N 用双波长紫外比色法测定; 土壤 NH_4^+ -N 用靛酚蓝比色法测定; 速效氮(AN)用碱解扩散法测定; 全钾(TP)用火焰光度法测定。

1.4 数据分析

试验数据在 Excel 2016 统计软件中进行整理。运

用 IBM SPSS 26.0 软件的单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同月份下的高寒草甸草地植被群落特征和土壤养分含量进行多重比较, 采用 Origin Pro 2021 绘图。采用 Canoco 5.0 统计软件对退化高寒草甸植被特征与土壤因子关系的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)^[27-28]。

2 结果与分析

2.1 退化高寒草甸植物群落特征

高寒草甸植物高度、Patrick 指数、Pielous 指数和总生物量的变化规律不一致(表 2)。盖度表现出逐渐增加的月际动态, 不同月份间差异显著($P < 0.05$)。Patrick 指数、Pielous 指数没有明显的月际动态, 不同月份间差异显著($P < 0.05$)。总生物量在 2021 年的变化最为明显, 呈现出先增加后降低的变化趋势, 7—8 月增加了 123.63%。高度和 Shannon—Wiener 指数月份间的差异不显著。

表 2 退化高寒草甸的变化

Table 2 Dynamics changes in vegetation community characteristics in degraded alpine meadows

时间 年 月		高度/cm	盖度/%	Patrick 指数	Shannon— Wiener 指数	Pielous 指数	总生物量/ (g·m ⁻²)
2020	7	4.48±0.75 ^a	55.83±2.67 ^c	14.00±1.10 ^b	1.78±0.02 ^a	0.68±0.02 ^a	78.24±1.30 ^c
	8	6.57±20.20 ^a	64.00±1.00 ^b	14.50±1.05 ^{ab}	1.83±0.02 ^a	0.67±0.01 ^b	95.29±1.47 ^b
	9	5.46±1.53 ^a	68.67±1.25 ^a	15.50±1.05 ^a	2.01±0.02 ^a	0.65±0.01 ^c	114.39±1.17 ^a
2021	7	6.34±2.03 ^a	58.41±0.01 ^c	12.67±1.25 ^b	1.79±0.01 ^a	0.71±0.02 ^b	124.07±1.43 ^b
	8	6.70±1.61 ^a	65.12±0.01 ^b	14.50±1.50 ^a	1.79±0.01 ^a	0.67±0.01 ^c	277.46±3.92 ^a
	9	7.63±1.67 ^a	69.03±0.02 ^a	10.67±0.47 ^c	1.79±0.02 ^a	0.76±0.02 ^a	96.94±1.38 ^c
2022	7	5.46±1.10 ^{ab}	58.47±0.02 ^c	13.17±0.69 ^a	1.78±0.02 ^a	0.69±0.02 ^a	104.69±24.46 ^b
	8	7.21±1.31 ^a	67.19±0.01 ^{ab}	12.50±1.26 ^b	1.78±0.01 ^a	0.71±0.06 ^a	87.21±17.55 ^b
	9	8.52±1.76 ^a	71.09±0.01 ^a	11.67±1.11 ^c	1.78±0.01 ^a	0.73±0.03 ^a	130.09±1.53 ^a

注: 表中小写字母代表植被群落特征在同一年份不同月份之间的差异显著($P < 0.05$)。

2.2 退化高寒草甸植物功能群生物量的变化

禾本科生物量整体上表现出逐渐上升的变化趋势, 2022 年的变化尤为明显, 相比于 7 月, 9 月禾本科生物量增加了 181.65%, 差异显著($P < 0.05$)(图 1)。莎草科生物量整体上表现出增加的变化趋势(2021 年除外), 2020 年 9 月的生物量较 7 月增加了 181.99%, 差异显著($P < 0.05$)。杂类草生物量整体上表现出先增加后降低的变化趋势(2022 年除外), 2021 年的变化趋势尤为明显, 8 月较 7 月增加了 409.87%, 差异显著

($P < 0.05$)。莎草科和杂类草生物量均在 2021 年 8 月存在最大值。

2.3 退化高寒草甸土壤养分的变化

高寒草甸土壤全氮、铵态氮、硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾存在显著的月际动态变化规律($P < 0.05$)。土壤全氮、铵态氮、硝态氮、速效氮和有机碳含量整体上先上升后降低, 均在 8 月达到峰值。全磷和全钾含量变化没有规律, 月份间差异显著($P < 0.05$)。

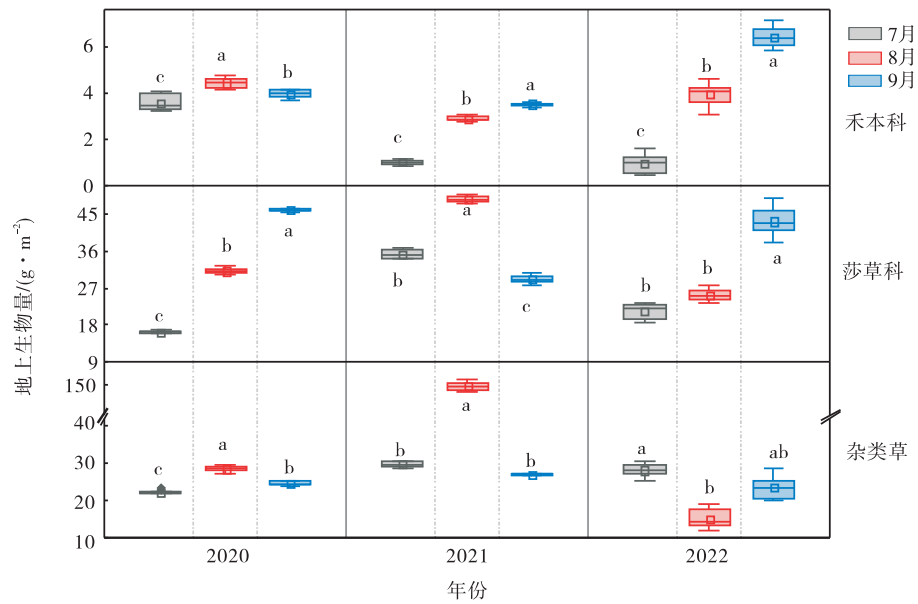


图 1 退化高寒草甸植物功能群地上生物量组成

Fig. 1 Aboveground biomass composition of functional groups of degraded alpine meadow plants

注: 图中不同小写字母表示功能群生物量在同一年份不同月份间的差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

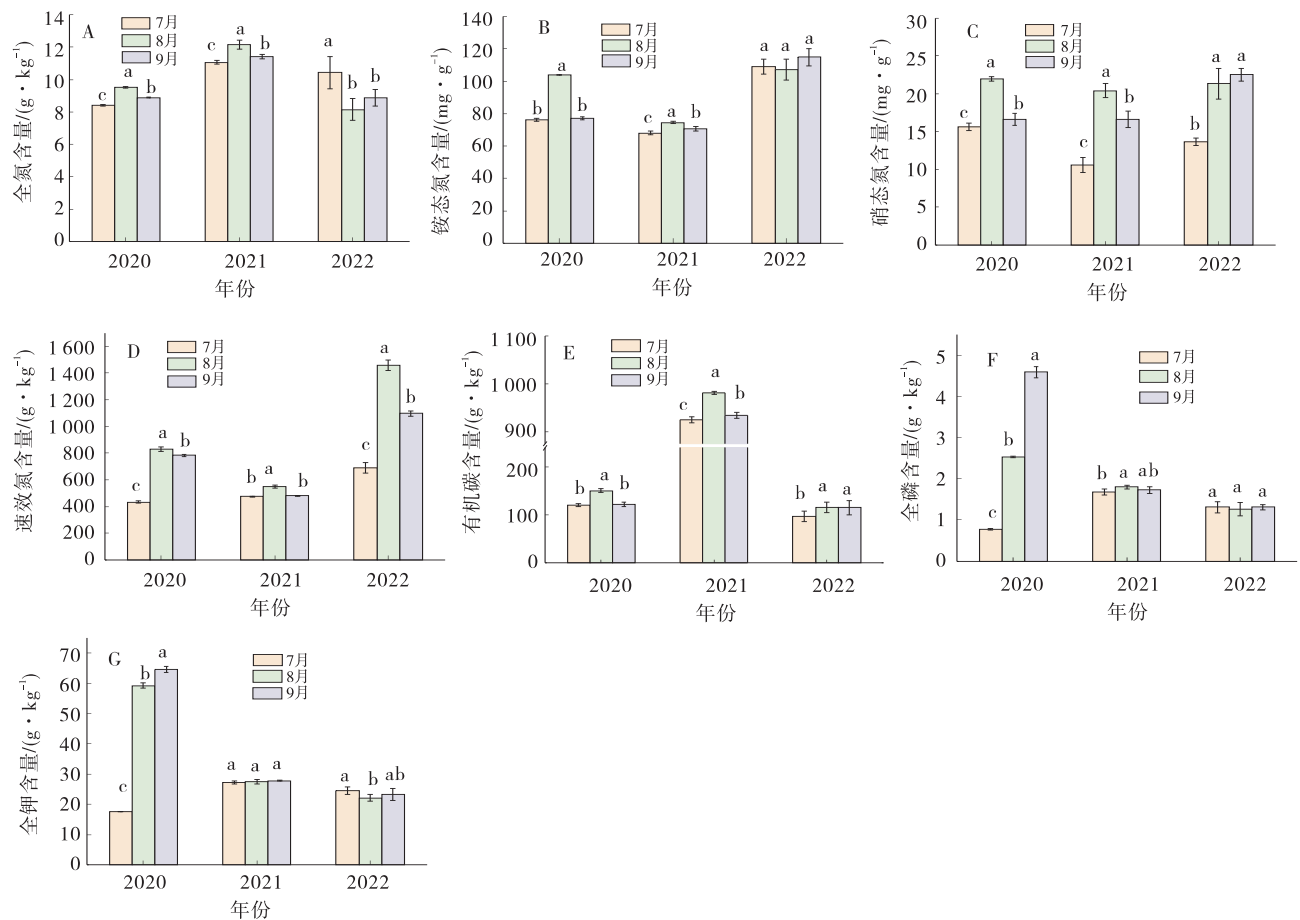


图 2 退化高寒草甸土壤养分的变化

Fig. 2 Changes in soil nutrients in moderately degraded alpine meadows

2.4 高寒草甸植被特征与土壤理化性质相关性分析

高寒草甸草地土壤全磷和全钾含量与植物总生物量、高度和 Pielous 指数呈极显著正相关 ($P < 0.01$),

与 Patrick 指数呈极显著负相关 ($P < 0.01$) (图 3)。植物盖度与土壤全氮和有机碳呈极显著正相关 ($P < 0.01$); Shannon—Wiener 指数和总生物量与土壤硝态

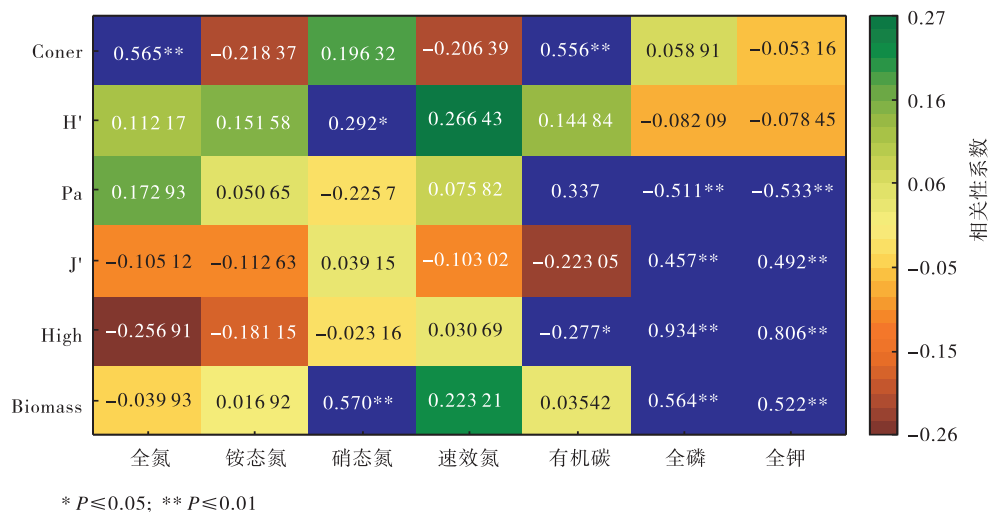


图3 退化高寒草甸植被特征与土壤理化性质相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between vegetation characteristics and soil physical and chemical properties in degraded alpine meadows

氮呈显著正相关($P < 0.05$);土壤有机碳、盖度和Patrick指数呈极显著正相关($P < 0.01$),与高度呈极显著负相关($P < 0.01$)。

2.5 植被特征与土壤因子关系的RDA排序分析

对退化高寒草地植物群落特征与土壤理化指标进行RDA排序(图4),轴1和轴2分别解释总变异的64.37%和29.13%。

对植被特征影响最大的土壤因子是土壤有机碳和全氮。Shannon—Wiener多样性指数与全磷含量、全钾含量正相关,与全氮含量、有机碳含量、硝态氮含量、速效氮含量、铵态氮含量负相关。Patrick丰富度指数与全磷含量、全钾含量、全氮含量、有机碳含量正相关,与硝态氮含量、速效氮含量、铵态氮含量负相关。生物量与全氮含量、有机碳含量、全磷含量、全钾含量、硝态氮含量正相关,与速效氮含量、铵态氮含量负相关。盖度与硝态氮含量、速效氮含量、有机碳含量、全氮含量、全磷含量正相关,与全钾含量、铵态氮含量负相关。高度与铵态氮含量、速效氮含量、硝态氮含量、有机碳含量、全氮含量正相关,与全磷含量、全钾含量负相关。Pielous均匀度指数与铵态氮含量、速效氮含量、硝态氮含量正相关,与有机碳含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量负相关。

3 讨论

3.1 退化高寒草甸植物群落组成的变化

植物群落特征变化能够反映草地生态系统的物

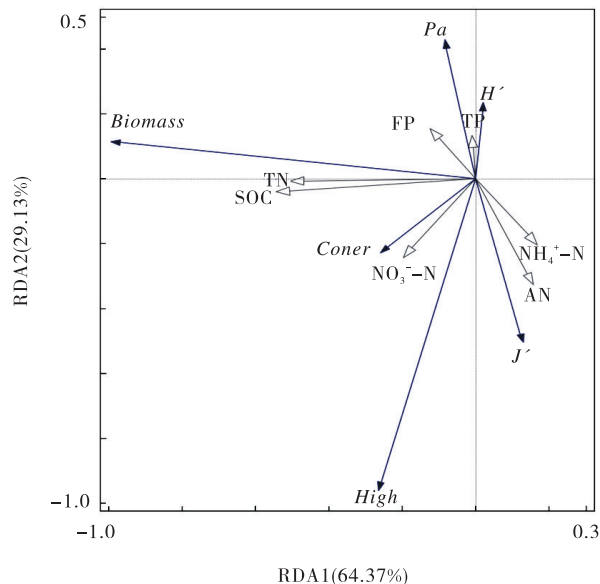


图4 退化高寒草甸植被特征与土壤因子关系的冗余分析

Fig. 4 RDA ordination diagram of the relationship between vegetation characteristics and soil factors in degraded alpine meadows

注:TN 全氮,AN 速效氮, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 铵态氮, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 硝态氮,SOC 有机碳,FP 全磷,TP 全钾,Cover 盖度,High 高度, H' Shannon—Wiener多样性指数, J' Pielous均匀度指数,Pa Patrick丰富度指数,Biomass 生物量。

种组成及多样性的变化,对高寒草甸植被群落特征的长期研究有助于遏制退化高寒草甸的进一步退化和草地资源的永续利用^[29-30]。本研究持续3年的观测结果展示,高寒草甸植物盖度、Patrick指数、Pielous指数和总生物量没有统一的月际动态变化规律,但月际差异显著($P < 0.05$)。可能是因为试验草甸位于半干

旱地区,植被生长季降水少^[23]。降水量作为高寒草甸植被生长发育的限制因子,试验区水分的阈值发生微妙的变化对草甸植物群落与组成产生直接和间接的效应。为了进一步明晰三江源区水分对植物群落的影响,通过对降水量与 Patrick 指数、Pielous 指数和总生物量作拟合回归(图 5),发现降水量与 Patrick 指数(图 5-A)和 Pielous 指数(图 5-B)存在显著差异($R^2=0.59, P<0.01$; $R^2=0.52, P=0.016$)。高寒草甸植被生长季水分在年际间的差异可能是导致植物群落特征没有明显规律的原因。试验区植被自 5 月底开始返青,6—8 月草地植物生长迅速,植被盖度、高度、生

物量等均发生变化,但 9 月逐渐进入秋季,气温逐渐下降,光合作用随之减弱,植物生长逐渐停止^[31]。本研究发现,退化高寒草甸植物高度和 Shannon—Wiener 指数月际间的差异不显著,这与杨元武^[32]、李军豪^[3]的研究不一致,可能是试验区草甸退化程度导致的差异,未退化草甸为较完整的草地生态系统,整体较为稳定,优良牧草是主要建群种,Shannon—Wiener 指数和 Patrick 指数比较稳定^[33]。不同区域所处自然环境以及人为干扰不同,高寒草甸物种多样性也存在一些独特的域性特点^[3]。这还有待于进一步长期观测。

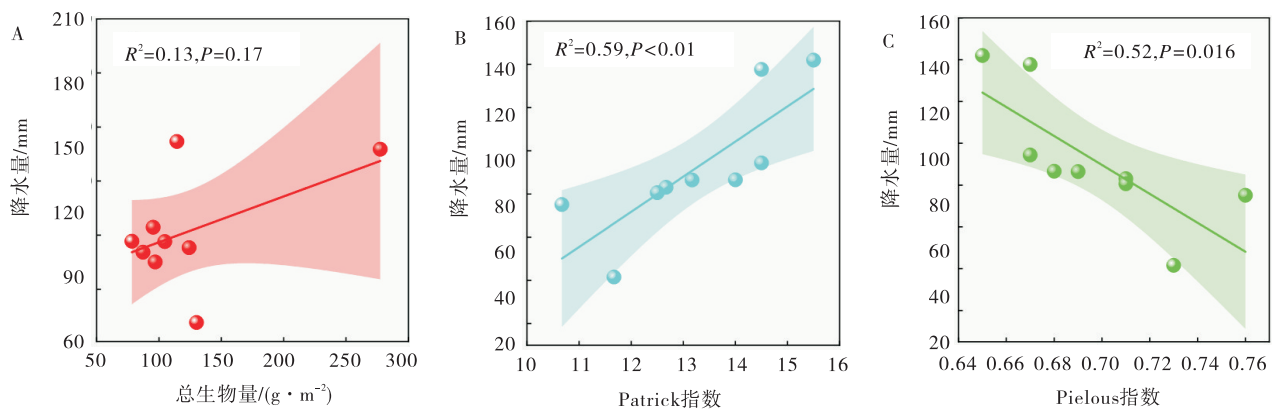


图 5 降水量对 Patrick 指数, Pielous 指数和总生物量的影响

Fig. 5 Effect of precipitation on Patrick's index, Pielous index and total biomass

依据生态位互补效应,群落中一种功能群数量下降会其他功能群提供空间和资源,使其迅速生长^[23,26]。这一现象在退化草甸较为普遍,草甸退化,优势牧草减少,毒杂草快速入侵、大量繁殖,占据更大空间的生态位,杂草种类繁多,一定程度上导致草甸多样性增加^[34]。本研究发现,高寒草甸植物功能群生物量存在显著的动态变化,其变化趋势基本一致($P<0.05$)(除 2022 年杂类草)。禾本科生物量随着植物物候期的推移逐渐增加,莎草科生物量整体上表现出增加的动态趋势,这与试验区草甸类型有关,是由高山嵩草+矮嵩草为主的草地类型,杂类草生物量整体上表现出先增加后降低的动态变化,二者之间的互补效应保持草甸群落组成与结构的稳定。这与已有的研究结果相吻合^[35]。

3.2 退化高寒草甸土壤理化性质的变化

土壤养分是植物生长发育的物质基础,对植物群落的结构和功能起决定性作用。土壤有机碳、氮和磷

是土壤主要的养分指标,而且有机碳是形成土壤结构的首要因素,直接决定土壤肥力状况^[26,36]。本试验发现,土壤全氮、铵态氮、硝态氮、速效氮和有机碳含量整体上反映出相似的变化规律,均在 8 月达到峰值,月际间差异显著($P<0.05$),这与已有研究结果不一致^[31]。可能原因,地上植被向土壤归还养分是土壤全氮含量的增加的主要方式^[37]。植物生长旺盛,根系分泌物会影响土壤硝化反应,显著增加硝态氮和铵态氮的含量。同时,大量的土壤动物的活动,疏松土壤,土壤的团粒结构增加,稳定性团聚体升高^[38]。这与本研究结果不一致,可能是由于两者的环境因素及人为干扰等因素导致的差异,其试验区土壤速效氮含量 145.83 mg/kg,速效磷含量 14.67 mg/kg,速效钾含量 115.60 mg/kg^[20],远高于本研究试验区土壤速效氮含量 14.0 mg/kg,速效磷含量 7.0 mg/kg,速效钾含量 76.5 mg/kg。另一个原因,可能是土壤微生物群落组合、土壤溶解有机物和多养分循环相互作用的主导过

程^[39]。微生物群落多样性和组成是潜在土壤养分循环的重要预测因素。本研究发现,全磷和全钾含量没有统一的变化规律,月际间差异显著($P < 0.05$),这与Shen^[40]的研究结果吻合。可能是由于土壤具有滞后性和复杂性,土壤中磷矿化时间非常漫长,再加上试验区常年低温,导致土壤微生物活性下降,全磷含量的动态变化无法在短时间内得到明显的规律。因此,需要进一步探索。

3.3 退化高寒草甸植物群落特征与土壤环境因子的关系

植被与土壤相互作用、相互影响,二者互为因果^[41]。植被退化是青藏高原高寒草甸土壤退化的直接原因^[42],而土壤又是草地生态系统的重要基质,土壤退化必然引起植被退化^[36],故植被退化和土壤退化互为因果关系^[43-44]。植被物种组成、立地条件和外在干扰等因素的影响导致植被与土壤关系的不同,已有研究结果也存在差异^[45]。大量研究表明,植被群落多样性和生物量与土壤理化性质存在明显的关系^[26,46]。本研究表明,土壤全磷和全钾含量是影响植物总生物量、高度、Pielous指数和Patrick指数的环境因子,全氮和有机碳含量是影响植物盖度的环境因子,土壤硝态氮是影响Shannon—Wiener指数和总生物量的环境因子,土壤有机碳是影响盖度和Patrick指数的环境因子。可能原因是土壤酶活性的高低与土壤中可供植物利用的营养元素的多少有关,土壤酶活性较高,其矿质化作用强度愈大,愈有利于系统内的营养物质循环^[47]。有些变量之间差异不显著的原因可能是退化草甸草地生态系统的能流和物流平衡状态被打破。土壤亚系统的结构无法正常发挥其功能,为植物生长提供所需要的空间、养分和水分^[39]。也有可能是植被和土壤系统耦合关系的丧失和系统相悖所致。植被退化,根系减少导致土壤中的凋落物和腐殖质减少,土壤微生物数量减少,土壤酶活性显著下降,使得土壤营养的持续供给能力逐渐减弱,土壤肥力下降^[42]。同时,植被在不同生长阶段对养分的吸收不尽相同,受植物系统位置、生活史、土壤养分利用有效性和冻土层等多重因素的影响导致植被对土壤养分的利用策略有异。土壤理化性质的改变会造成植物生态位分化,植物群落组成和优势种发生演替,加速了高寒

草甸的退化演替^[48]。但由于三江源区高寒草甸所处的独特环境及以牧业为主的人类活动,无法与其他不同特点区域的退化草地进行比较^[49-50],其植被退化和土壤退化之间的响应关系可能更为复杂,但具体差异还需进一步研究。后续研究应明确高寒草甸植被的养分利用测略、植被多样性驱动土壤养分循环及植被与土壤系统耦合与解耦机制的驱动因素,有助于三江源区退化草甸的管理和永续利用。

4 结论

三江源区退化草甸植物群落特征和功能群生物量没有统一的变化规律,整体表现为8月有最大值。土壤养分与植物群落间存在显著正相关,对植被特征影响最大的土壤因子是土壤有机碳和全氮。

参考文献:

- [1] 周选博. 返青期休牧对三江源区高寒草甸植被和土壤特征的影响[D]. 西宁:青海大学,2021.
- [2] Bryant J A, Lamanna C, Morlon H, *et al.* Microbes on mountainsides: contrasting elevational patterns of bacterial and plant diversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(S1): 11505—11511.
- [3] 李军豪,杨国靖,王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2109—2118.
- [4] 张琛悦,赵霞,辛玉春,等. 青海省草地生态系统碳储量及其分布特征[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(2): 286—292.
- [5] 张佳宁,张靖庚. 青藏高原高寒草甸资源可持续利用的放牧对策及建议[J]. *中国草食动物科学*, 2017, 37(6): 63—67.
- [6] Wang Z, Zhang Y, Yang Y, *et al.* Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai—Tibet Plateau, in China [J]. *Ecological Informatics*, 2016, 33: 32—44.
- [7] 张中华,周华坤,赵新全,等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. *生物多样性*, 2018, 26(02): 111—129.
- [8] Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai—Tibetan plateau: a review of the evidence of its magnitude and causes [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 1—12.

- [9] Legnert L W, Meyer H, Wang Y, *et al.* Retrieval of grassland plant coverage on the Tibetan Plateau based on a multi-scale, multi-sensor and multi-method approach [J]. *Remote sensing of Environment*, 2015, 164: 197–207.
- [10] 党承林,王崇云,王宝荣,等. 植物群落的演替与稳定性[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(2): 30–35.
- [11] 张荣,孙国钧,李凤民. 冗余概念的界定与冗余产生的生态学机制[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(5): 844–851.
- [12] Hobbs R J, Norton D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology [J]. *Restoration ecology*, 1996, 4(2): 93–110.
- [13] 刘颖,李世雄,王彦龙,等. 休牧影响退化草地生态恢复的研究进展[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(5): 2–7.
- [14] 黄梅. 三江源区“黑土滩”人工草地长期围栏封育对植被、土壤和恢复力的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2021.
- [15] 程雨婷. 围栏封育后我国草地植被与土壤恢复的 Meta 分析研究[D]. 上海:华东师范大学, 2020.
- [16] 李晓燕,李永慧,秦文萍,等. 人工草地建植对三江源区退化高寒草甸土壤有机碳组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(1): 50–56.
- [17] 杨增增. 改良措施对退化高寒草甸植被与土壤的影响[D]. 西宁:青海大学, 2020.
- [18] 林伟山,德科加,张琳,等. 氮、磷添加对青藏高寒草甸土壤碳氮磷化学计量特征影响的 Meta 分析[J]. *草地学报*, 2022, 30(12): 3345–3354.
- [19] 德科加. 施肥对三江源区高寒草甸初级生产力和土壤养分的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2015.
- [20] 向雪梅,德科加,张琳,等. 不同形态氮素添加下三江源区高寒草甸草场氮素分配与利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(03): 511–520.
- [21] 林伟山. 称多县高寒草甸草地植被—土壤系统生物量和养分的动态变化研究[D]. 西宁:青海大学, 2023.
- [22] 林伟山,德科加,钱诗祎,等. 高寒草甸植被—土壤养分含量与气象因子相关关系研究[J]. *草原与草坪*, 2023, 43(6): 109–120.
- [23] 段成伟,李希来,柴瑜. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7652–7662.
- [24] 向雪梅,德科加,林伟山,等. 氮素添加对高寒草甸植物群落多样性和土壤生态化学计量特征的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(12): 2769–2777.
- [25] 白可喻,戎郁萍,杨云卉,等. 北方农牧交错带草地生物多样性与草地生产力和土壤状况的关系[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 22–26.
- [26] 杨军,刘秋蓉,王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4067–4072.
- [27] Garcia C, Hernandez T, Albaladejo J, *et al.* Revegetation in semiarid zones: influence of terracing and organic refuse on microbial activity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(3): 670–676.
- [28] 尹亚丽. 三江源区退化高寒草甸土壤—微生物互作研究[D]. 西宁:青海大学, 2020.
- [29] 李学斌,马琳,杨新国,等. 荒漠草原典型植物群落枯落物生态水文功能[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(5): 834–828.
- [30] 王彦龙,马玉寿,施建军,等. 黄河源区高寒草甸不同植被生物量及土壤养分状况研究[J]. *草地学报*, 2011, 19(1): 1–6.
- [31] 任灵. 青藏高原高寒草甸土壤与牧草养分在不同培育措施下的季节动态研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2016.
- [32] 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): 1211–1217.
- [33] 杨元合,饶胜,胡会峰,等. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系[J]. *生物多样性*, 2004, 12(1): 200–205.
- [34] 刘淑丽,林丽,张法伟,等. 放牧季节及退化程度对高寒草甸土壤有机碳的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(1): 11–18.
- [35] Dong Q, Zhao X, Ma Y, *et al.* Effects of stocking rate and grazing time of yaks on soil nutrient contents in Kobresia parva alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005(7): 729.
- [36] 周华坤,赵新全,周立,等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. *草业学报*, 2005, 14(3): 31–40.
- [37] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. *Annals of applied biology*, 2013, 162(2): 145–173.
- [38] 王向涛,张世虎,陈懂懂,等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究[J]. *草地学报*, 2010, 18(4): 510–516.

- [39] Wang S, Heal K V, Zhang Q, *et al.* Soil microbial community, dissolved organic matter and nutrient cycling interactions change along an elevation gradient in subtropical China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345:118793.
- [40] Shen J, Yuan L, Zhang J, *et al.* Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. *Plant physiology*, 2011, 156(3): 997—1005.
- [41] 李绍良, 陈有君, 关世英, 等. 土壤退化与草地退化关系的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 92—95.
- [42] 魏卫东, 李希来. 三江源区不同退化程度高寒草地土壤特征分析[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(6): 1102—1106.
- [43] 尹亚丽, 王玉琴, 李世雄, 等. 三江源区退化高寒草甸土壤微生物群落季节特征研究[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1791—1800.
- [44] 王英成. 三江源区退化高寒草甸土壤微生物多样性及空间变化规律研究[D]. 西宁: 青海大学, 2021.
- [45] 华青措. 氮磷钾不同施肥配方对高寒草甸植物养分及土壤养分的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2017(5): 144—145.
- [46] Verdoodt A, Mureithi S M, YE L, *et al.* Chronosequence analysis of two enclosure management strategies in degraded rangeland of semi-arid Kenya[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2009, 129(1—3): 332—339.
- [47] 焦婷, 常根柱, 周学辉, 等. 高寒草甸草场不同载畜量下土壤酶与土壤肥力的关系研究[J]. *草业学报*, 2009, 18(6): 98—104.
- [48] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1298—1305.
- [49] 郭承录, 李宗礼, 陈年来, 等. 石羊河流域下游民勤绿洲草地退化问题分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(6): 62—71.
- [50] 赵万羽. 新疆荒漠草地退化与治理建设方略[J]. *中国草地*, 2002, 24(3): 69—73.

Characterization of vegetation communities and soil nutrient changes in degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau

LIN Wei-shan¹, DE Ke-jia^{1,2*}, XIANG Xue-mei¹, FENG Ting-xu¹, LI Fei¹,

WEI Xi-jie^{1,2}

(1. *Qinghai Academy of Animal Husbandry and Veterinary Science, Qinghai University, Xining 810016, China*; 2. *Qinghai Academy of Animal Husbandry and Veterinary Science, Xining, 810016, China*)

Abstract: [Objective] Taking the moderately degraded alpine meadows in Sanjiangyuan area as the research object, we analyzed the dynamic changes of plant community characteristics, soil nutrients, and their variability in degraded alpine meadows. This investigation aims to explore the relationship between the two, and to identify the key factors affecting plant community characteristics. The findings provide the basic data for the scientific management and sustainable utilization of degraded alpine meadows in Qinghai-Tibetan Plateau. [Method] Field measurements were conducted in Yushu Prefecture, Qinghai Province, in the months of July, August, and September from 2020 to 2022. Plant height, cover, Patrick index, Pielou's evenness index, Shannon-Wiener index, and total biomass of plants were recorded. Soil samples were analyzed for total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, quick nitrogen, organic carbon, total phosphorus, and total potassium. The one-way analysis of plant and soil indicators was used to analyze the correlation between plant community characteristics and soil nutrients. The RDA analysis of vegetation

characteristics and soil physicochemical properties was performed using Canoco 5.0 software to evaluate the relationship between vegetation traits and soil physiochemical properties. 【Result】 The Patrick index, Pielou's index, and total biomass displayed significant monthly variation but no consistent seasonal trend. In contrast, the biomass of plant functional groups generally increased over time, with consistent patterns across years (except for miscellaneous grasses in 2022). Soil total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, quick nitrogen and organic carbon peaked in August. Soil total phosphorus and total potassium showed strong positive correlations with total plant biomass, height, and Pielou's index, and significant negative correlations with the Patrick index. Plant cover was positively correlated with soil total nitrogen and organic carbon, while the Shannon-Wiener index and total biomass were positively correlated with soil nitrate nitrogen. 【Conclusion】 Plant community characteristics and functional group biomass in degraded alpine meadows exhibited variable seasonal patterns, with most indicators peaking in August. There was a significant positive correlation between soil nutrients and plant communities, with soil organic carbon and total nitrogen being the most influential factor.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; alpine meadows; vegetation diversity; soil nutrients; dynamic changes

(责任编辑:刘建荣)