

不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势种叶片功能性状比较

杨晶^{1,2}, 张倩^{1,2}, 方青慧^{1,2}, 卢研^{1,2}, 张彩军^{1,2}, 姚宝辉^{1,2},
孙小妹^{1,2}, 苏军虎^{1,2}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃农业大学资源与环境学院, 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, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学-新西兰梅西大学草地生物多样性研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:比较高寒草甸连续放牧(CG)、传统放牧(TG)、生长季休牧(GSG)和禁牧(PG)不同放牧管理模式下4种共有优势种垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、扁蓿豆(*Medicago ruthenica*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)的叶长、叶宽、叶周长、叶面积及比叶面积(SLA)的差异,旨在为高寒草甸的放牧管理提供参考。结果发现:1)垂穗披碱草叶长、叶周长及叶面积的大小次序为:GSG>PG>TG>CG,SLA表现为:CG>PG>TG>GSG;与CG管理模式相比,GSG、TG和PG的矮嵩草叶面积分别减小了40.13%、56.06%和61.83%,SLA依次为:TG>GSG>TG>CG;鹅绒委陵菜叶长、叶周长和叶面积,扁蓿豆的叶周长、叶面积及SLA均表现为:GSG>PG>TG>CG;2)叶片性状的变异系数显示,垂穗披碱草的叶宽和SLA,矮嵩草叶面积具有较强的可塑性,扁蓿豆SLA和叶宽可塑性较强,鹅绒委陵菜的SLA、叶面积可塑性最强;3)Pearson相关分析表明,放牧管理下的土壤紧实度与有机质显著影响了叶片功能性状。物种间综合比较发现,鹅绒委陵菜叶片功能性状的可塑性是适应退化高寒草甸的一个重要因素。

关键词:放牧管理模式;叶片功能性状;比叶面积;相关性

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)06-0015-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2021.06.003



植物叶片是高等植物进行光合作用和物质生产的主要器官,是生态系统中初级生产者的能量转换器^[1-3]。作为植物体暴露在环境中表面积最大的器官,对环境变化具有敏感的感知力和较强的形态结构可塑性^[4],能准确地反映植物对环境变化的响应,也与资源获取和利用密切相关^[5-6]。因此,植物叶片的功能性状与植物对资源的获得及利用能力有密切的关联

性,客观表达了植物对外界环境的适应性^[2,7]。

放牧作为草地利用的主要方式,是人类在草原生态系统管理中施加于草原的主要人为干扰方式。家畜通过偏食性、粪尿排泄和畜蹄践踏来影响草原环境,使物种的形态特征和草地群落结构、物种组成发生变化,过高的放牧强度也会使物种多度分布格局改变,植被组成逐渐趋向单一化而呈现草地退化^[8-9]。研究发现,长期放牧会使植物呈现矮小化^[10],叶片的形态性状(叶片长度、叶片宽度、叶片面积和叶周长等)、功能性状(比叶面积和比叶干重等)和结构性状(叶形状和叶柄形状等)也会发生变化,从而直接影响植物的行为和功能^[11]。长期以来,基于植物功能性状预测放牧干扰对草地生态系统功能的影响被广泛关注^[12-14]。比叶面积(specific leaf area, SLA)是叶片面积和质量的

收稿日期:2021-01-05; 修回日期:2021-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 31460566, 31760706); 陇原青年创新创业人才项目(LYRC2019-05)

作者简介:杨晶(1994-),女,甘肃省白银人,硕士研究生。

E-mail:1052258067@qq.com

苏军虎为通信作者。E-mail:sujh@gsau.edu.cn

比值,与植物的生长和生存对策联系紧密,可反映植物对资源的获取能力和对不同环境的适应特征^[15-17]。在中、低放牧强度下,家畜的选择性采食导致高大植物(大的 SLA)种类减少,矮小植物(小的 SLA)种类增加,并成为优势种^[18-19]。然而,基于植物叶性状预测植物对放牧的响应,也会受到生产力、资源有效性、放牧强度和放牧历史等因素的影响^[20-21]。目前对荒漠草原植物叶片性状如何响应放牧的相关研究较少^[22],对高寒草甸相关的研究也只是针对个别种的研究^[6,10],没有考虑共有优势种之间的影响。研究不同放牧管理模式下植物的叶性状变异特征及种间差异性响应认识,可揭示植物在高寒草甸草地退化过程中对放牧干扰的适应对策,对于深入理解高寒草地生态系统植被恢复演替具有重要作用。因此,本研究选取不同放牧管理模式长期作用下的共有优势种,分析其叶片性状:叶长、叶宽、叶周长、叶长宽比、叶面积、SLA 及其与土壤理化特性间的相关性,旨在为青藏高原高寒草甸合理放牧管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙镇,地理位置为 N 37°10′~37°14′,E 102°40′~102°49′E,海拔 2 900 m。气候寒冷湿润,太阳辐射较强,年均温为-0.1℃,年降水量约为 400 mm,多为地形雨,主要集中于每年的夏季,无绝对无霜期,只有冷热两季^[23]。草地类型主要为高寒草甸,主要优势种为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、苔草(*Carex giraldiana*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等。

1.2 样地设置

2019 年 8 月初在天祝县抓喜秀龙乡选择连续放牧样地(Continuous grazing, CG),面积 1.44 hm²,全年连续放牧,放牧率为 8.37 羊单位/(hm²·a),传统放牧样地(Traditional grazing, TG),面积 18 hm²,每年在 6 月下旬到 9 月下旬间休牧,其余时间自由放牧,放牧率为 6.08 羊单位/(hm²·a) 生长季休牧样地(Growing season grazing, GSG),面积 1.47 hm²,时间为 2015~2019 年,生长季放牧率为 0,非生长季放牧率为 4.53 羊单位/(hm²·a),每年在 4 月到 9 月间休

牧,其余时间自由放牧禁牧样地(Prohibition grazing, PG),面积 5.2 hm²,时间为 2011—2019 年,全年禁牧,每个草地利用模式仅设置 1 个样地^[24],每个样地内随机设 3 个样区。

1.3 样品采集及指标测定

选择 4 种放牧管理模式样地,在每个样地中随机选取 3 个 0.5×0.5 m 的样方,样方间隔 8~10 m,在每个样方内用直径为 10 cm 的土钻随机收集 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层的土样 3 次,在试验样地的裸斑处避免设置取样点,并将 3 次取得的土样按土层深度混合均匀成一个土样,把所有土样均装入密封袋带回实验室分析。在实验室内先将土壤样品中的凋落物、植物根系及石头等杂质去除,其次将土样放在土壤风干室内自然风干,经充分研磨后过 0.25 mm 的尼龙筛,最后测定土壤全氮、全磷、全钾、有机质和有机碳含量及土壤 pH 值,pH 值采用电位法;土壤容重用 HY-1000 土壤容重仪测定,土壤含水量的测定用烘干法,紧实度用土壤紧实度仪测定,每样地内重复测定 10 次^[25]。土壤全氮采用凯氏定氮法测定,有机质采用重铬酸钾氧化-稀释热法,土壤全磷采用钼锑抗比色法测定,土壤全钾采用火焰分光光度计测定^[26]。植物的叶片特征包括叶长、叶宽、叶周长、叶面积、叶长宽比、比叶面积(SLA)。2019 年 8 月初,植被处于生长盛期,在 4 个样地中随机采取高寒草甸共有优势种垂穗披碱草、矮嵩草、扁蓿豆和鹅绒委陵菜的完整、健康叶片,每个样区采集各优势植物叶片 50 片,叶片采集后直接用叶面积扫描仪(MRS-2400U2)扫描叶片,测叶片特征,随后将其装入信封,带回实验室,将叶片 105℃ 杀青 0.5 h,在 65℃ 烘干至恒重,测定叶片干重,计算 SLA (SLA=叶片面积/叶片干重)^[27],变异系数(%)=标准差/平均值^[28]。

1.4 数据分析

用 SPSS 19.0 对各样地共有优势植物叶片性状特征数据进行单因素方差(ANOVA)分析,检验各处理间的差异性,并计算所测叶片性状的平均值、标准差和各放牧管理模式间的变异系数。Pearson 相关分析法分析土壤理化特性与叶片性状间相关关系。图、表分别使用 Excel 2010 和 Microsoft PowerPoint 2010 进行绘制,图中误差线均采用标准误。

2 结果与分析

2.1 不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势种植物叶片性状特征

垂穗披碱草叶长、叶周长和叶面积在 GSG 管理模式下最大,其叶长与 CG、TG 和 PG 管理模式相比较,减小 95.65%、26.93%和 4.81%,叶周长逐次降低了 94.61%、26.99%和 8.34%,叶面积减少了 66.66%、33.14%和 3.72%,且差异均显著($P < 0.05$),叶宽在 PG 管理模式下最大,较 TG、GSG 和 CG 分别小 45.49%、35.09%和 35.55%;矮嵩草叶长在 PG 管理模式下最大,比 CG、GSG 和 TG 下的值分别大 68.10%、75.62%和 36.97%,叶面积在 CG 管理模式下最小,比 GSG、TG 和 PG 下逐次减小 40.13%、56.06%和 61.83%,且差异均显著($P < 0.05$),叶宽在 PG 管理模

式下最小,CG、GSG 和 TG 管理模式下比 PG 大 42.71%、78.50%和 82.79%,差异显著($P < 0.05$);鹅绒委陵菜叶长在 PG 管理模式下最大,比 CG、GSG 和 TG 管理模式分别大 71.48%、2.08%和 34.29%,叶面积在 GSG 下最大,较 CG、TG 和 PG 管理模式增加了 79.84%、63.79%和 15.94%,叶宽在 PG 下最大,与 CG、GSG 和 TG 小值相较减少了 21.46%、13.07%和 34.53%;扁蓿豆叶长和叶宽在 CG 管理模式下最小,叶长比 GSG、TG 和 PG 下减小了 50.12%、39.87%和 50.96%,而叶宽较 GSG、TG 和 PG 下依次小 49.16%、31.91%和 42.07%,叶周长在 PG 管理模式下最大,比 CG、GSG 和 TG 管理模式增加了 22.45%、0.36%和 2.76%,叶面积在 CG 下比 GSG、TG 和 PG 管理模式下依次减小 53.58%、21.43%和 47.51%(图 1)。

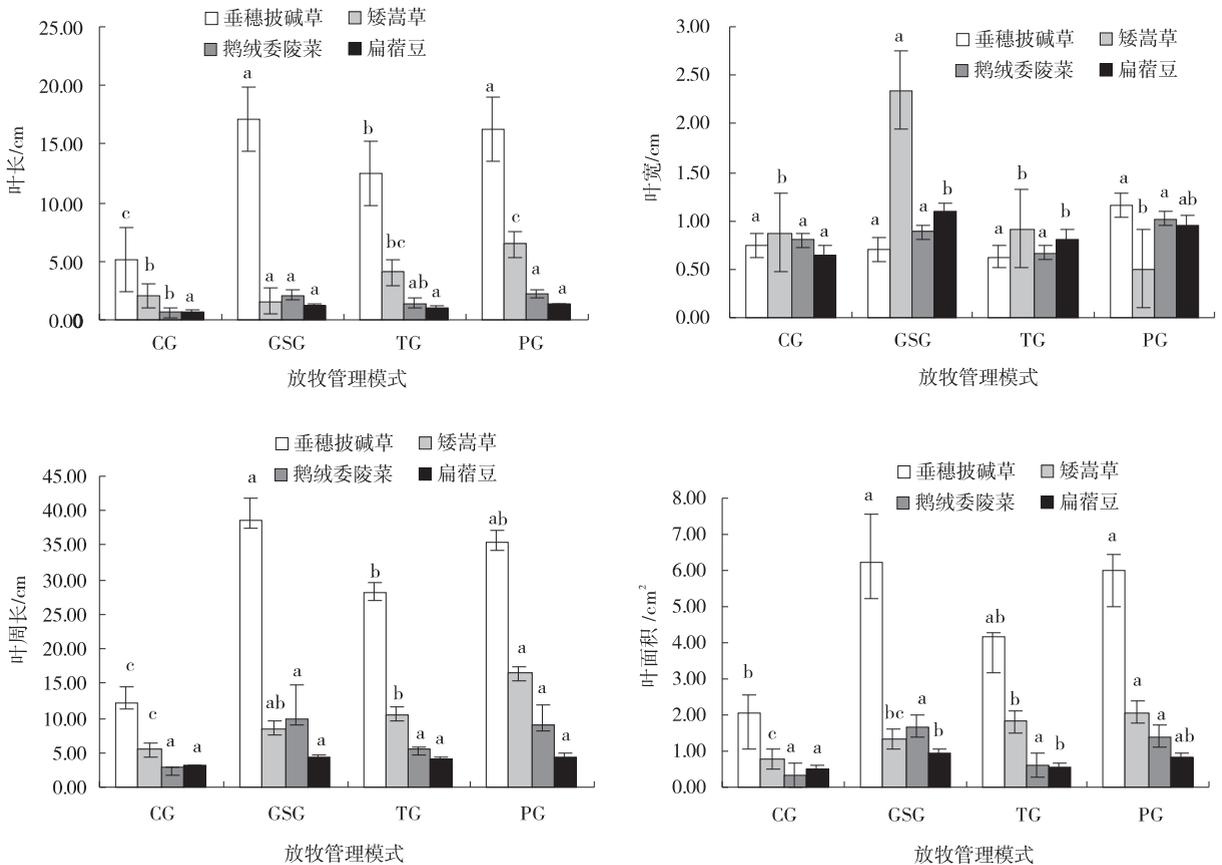


图 1 不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势种叶片性状

Fig. 1 Effects of grazing on leaf traits of common dominant species in alpine meadow

注:图中小写字母 a、b 和 c 表示不同放牧管理模式间叶片性状的差异性,CG:连续放牧,GSG:生长季休牧,TG:传统放牧,PG:禁牧,下同

垂穗披碱草 SLA 在 CG 管理模式下最大,较 GSG、TG 和 PG 下增加了 62.67%、61.95%和 56.05%,差异显著($P < 0.05$);矮嵩草 SLA 大小为:

TG>GSG>PG>CG,CG 管理模式下 SLA 与 TG、GSG 和 PG 相比分别减小了 11.25%、49.29%和 13.70%;鹅绒委陵菜 SLA 在 GAG 管理模式下最大,比

TG、PG 和 CG 下增加了 51.76%、56.95%和74.29%；扁蓿豆 SLA 大小为：TG>PG>CG >GSG，GSG 管理模式下比 TG、PG 和 CG 下依次减小了51.83%、30.84%和 29.32%，差异显著($P<0.05$) (图 2)。

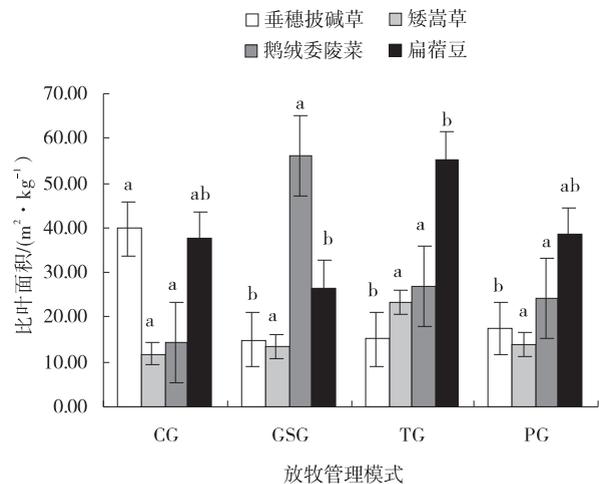


图 2 不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势种比叶面积

Fig. 2 Effects of grazing on specific leaf area of common dominant species in alpine meadow

2.2 不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势植物叶片性状变异系数

鹅绒委陵菜 SLA 在不同放牧管理模式间的变异程度较垂穗披碱草、矮嵩草和扁蓿豆大 59.48%、36.52%和 52.30%；垂穗披碱草叶长变异系数最小，较矮嵩草、鹅绒委陵菜和扁蓿豆减小了 55.51%、53.15%和 10.58%；垂穗披碱草叶宽的变异最大，与矮嵩草、鹅绒委陵菜和扁蓿豆相比降低了 5.69%、58.72%和 79.90%；鹅绒委陵菜叶周长变异系数最大，比垂穗披碱草、矮嵩草和扁蓿豆分别增加了73.19%、

57.77%和 72.00%，且优势种间的变异程度差异显著 ($P<0.05$)；鹅绒委陵菜的叶面积变异程度最大，与垂穗披碱草、矮嵩草和扁蓿豆相较依次增加了 59.87%、22.59%和 59.86% (图 3)。

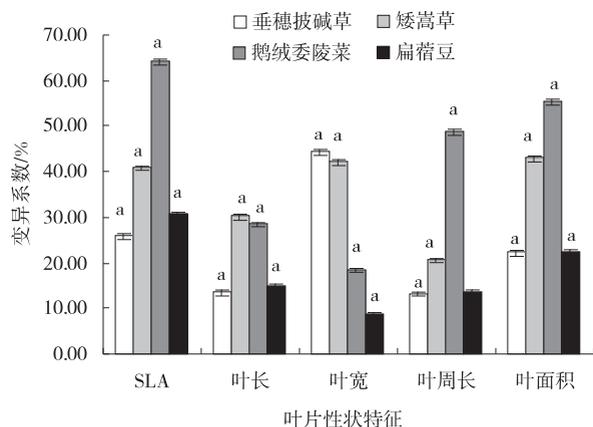


图 3 不同放牧管理模式下高寒草甸共有优势种叶片性状的变异系数

Fig. 3 Variation coefficient of leaf traits of common dominant species in alpine meadow under different modes of grazing management

注：小写字母表示不同植物间同一叶片性状的差异性

2.3 不同放牧管理模式下植物叶片性状与土壤理化特性间的相关性分析

放牧管理模式下，土壤有机质与植物叶长、叶周长呈极显著正相关 ($P<0.01$)，土壤全钾与叶宽、土壤有机质与叶面积成显著正相关 ($P<0.05$)，土壤紧实度与植物叶片叶绿素相对含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，土壤 pH、全氮、全磷、水分及容重与叶片性状均有相关性，但差异不显著 ($P>0.05$) (表 1)。

表 1 不同放牧管理模式下植物叶片性状与土壤理化特性间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of plant leaf traits and soil physical and chemical properties under different modes of grazing management

	pH	TN	TP	TK	有机质	水分	容重	紧实度
叶长	0.121	0.089	0.116	0.050	0.510**	0.229	-0.008	-0.182
叶宽	-0.196	0.058	0.155	0.362*	-0.050	0.003	0.122	-0.045
叶周长	0.091	0.102	0.146	0.069	0.468**	0.208	-0.016	-0.170
叶面积	0.023	0.131	0.168	0.038	0.450*	0.233	-0.042	-0.161
比叶面积	-0.208	-0.085	0.044	0.023	-0.270	-0.015	-0.088	0.677**

注：* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

3.1 放牧下高寒草甸共有优势种叶片性状特征

本研究发现，不同放牧管理模式对共有优势的叶

片性状有显著影响，生长季休牧下的垂穗披碱草、鹅绒委陵菜和扁蓿豆的叶面积、叶周长及叶长显著最高，而禁牧下的矮嵩草叶面积、叶周长及叶长较显著。主要由于各优势种长期在放牧管理模式为了躲避家畜的采

食,叶片表现出表型可塑性调整对策^[29],也可能是叶片性状在不同环境条件下的适应性及差异性的体现^[30]。李西良等^[31]对羊草(*Leymus chinensis*)的研究中发现,长期放牧将导致羊草各茎叶性状显著变小。形成叶片性状变化趋势的原因也可能是长期干扰导致高寒草甸退化,而叶片作为植物自身固碳部位,直接限制了其获取光资源及截取碳的能力,进而影响了植物的光合作用及蒸腾作用^[32],退化草甸的优势植物为维持高寒草甸植物群落多样性的稳定,迫使植物自身适应外界环境,物种间产生了共存关系^[29,33]。因此,在生长季休牧下,禾本科植物、杂类草和豆科植物的共存有利于高寒草甸生态系统的稳定性,更有益于该生态系统植物群落多样性的稳定存在。赵娜等^[34]研究发现植物在放牧后 SLA 降低,叶干物质含量增加;安慧^[22]对甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)研究发现放牧强度越大,SLA 大幅度增加,而细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)的 SLA 呈下降的变化趋势。本研究发现垂穗披碱草及矮嵩草叶片 SLA 在连续放牧下最大,鹅绒委陵菜和扁蓿豆叶片 SLA 在生长季休牧下最小。说明植物外形性状具有可塑性,植物为减少在干扰中自身资源的消耗和养分流失,会转换为资源保守型,同时反映了植物在生存环境改变中所呈现出的不同生态策略^[35]。Dijkstra 等^[36]研究发现 SLA 较小的植物,通常反映其保持体内营养的能力相对较强,对资源贫瘠和干旱环境的适应能力也相对较强。主要由于小的叶面积减少了水分的散失,降低了植物对光的捕获,对植物的光合作用形成阻力。因此,连续放牧管理模式有利于禾本科植物的光合作用,对牧草产量的增加有积极作用,为牧区的经济发展作出细微的贡献^[34,36]。所以,放牧影响着植物资源的分配,禾本科植物在较强的外界干扰下表现出积极的适应能力和生态适应性。在杨鑫等^[37]对葡萄叶形态性状的研究中发现,叶长是变异程度最明显的性状,表明其遗传性较丰富。本研究发现鹅绒委陵菜叶片 SLA、叶周长和叶面积变异系数最大,垂穗披碱草叶长变异系数最大。可能是鹅绒委陵菜是克隆植物,在外界环境下的适应性和可塑性强,而垂穗披碱草和矮嵩草及扁蓿豆是高寒草甸的原生种,其耐受性和生存临界点较低,导致鹅绒委陵菜叶片在不同放牧管理模式间的变异程度小于垂穗披碱草、矮嵩草和扁蓿豆;可能是本试验在采样时为考虑不同管理模式的放牧时间,使同样地的植物在研究中

存在不公平性;也可能是鹅绒委陵菜在 4 种管理模式高度处于中间,能较好地进行光合作用,使其能迅速进行无性繁殖,增大其生存领域,为其叶片及自身生活提供有利条件^[31,35],也可能是时间的影响,在采样时,放牧时间并不在试验取样点,叶片性状的差异有一定的时间因素,在本试验中未对时间进行设置,是本试验的一大缺点。因此,杂类草的叶片可塑性及生态适应力强于禾本科、莎草科和豆科。在高寒草甸的恢复中有着独一无二的作用,是其在高寒草甸中成为优势种的重要因素之一。

3.2 植物叶片性状与土壤理化特性间的相关性

本研究发现土壤紧实度对叶片比和叶面积有极显著影响,土壤紧实度的大小决定了土壤坚硬程度,土壤紧实度越小,植物根系越发达,将土壤养分及水分运输至植物冠层,为植物叶片提供养分,使植物叶片面积增大,促进光合作用合成有机物,对植物的生长有积极作用^[35],这与刘红梅等^[38]对植物叶片性状的研究结果相一致,主要是叶片性状与土壤理化性质密切相关。本研究认为土壤有机质对植物叶片性状影响较广泛,植物叶片叶长、叶周长及叶面积对土壤有机质均有显著响应,由于家畜排泄物、枯萎及死亡植物增加了土壤有机质的输入,使土壤养分含量增加,为植物生长提供有利条件,同时为植物叶片生长提供营养,促进了植物叶片叶长、叶周长及叶面积的生长,也可能是土壤有机质转化为有机碳等,增加了土壤碳氮比,有益于植物叶片生长及光合作用,最终促进植物叶片性状发生相应的变化^[35-36]。这与施宇等^[39]的研究结果相似,环境因素或外界干扰对植物叶片性状有一定的影响,放牧直接改变土壤紧实度、有机质等理化特性,而土壤理化特性决定着土壤结构,不利的外界因素导致植物水分吸收不足,土壤结构的改变导致不能输送水分等给叶片,叶片减小,最终使植物叶片性状发生改变^[40]。

4 结论

放牧是影响高寒草甸共有优势植物叶片性状的重要因素,叶片 SLA 减小,叶长、叶面积及叶周长减小是垂穗披碱草、矮嵩草、鹅绒委陵菜和扁蓿豆适应放牧干扰的性状表现。放牧对鹅绒委陵菜叶片性状的影响最明显,其变异系数也最大。放牧干扰下的土壤有机质对叶片性状(叶长、叶周长和叶面积)有显著影响。

参考文献:

- [1] McIntyre S, Lavorel S, Forbes J. Disturbance response in vegetation—towards a global perspective on functional traits[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10(5): 621—630.
- [2] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境及生态系统功能[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 150—165.
- [3] 武燕, 尹建军, 李善家. 黑河下游荒漠植物黑果枸杞叶片性状特征及其盐分响应[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1277—1284.
- [4] 李群, 赵成章, 王继伟, 等. 张掖湿地芦苇比叶面积和水分利用效率的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 4956—4962.
- [5] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展[J]. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(4): 325—339.
- [6] 杨继鸿. 青藏高原东缘常见阔叶木本植物叶片性状对环境因子的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [7] 宝乐, 刘艳红. 东灵山地区不同森林群落叶功能性状比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3692—3703.
- [8] Hobbs R J. Disturbance as a precursor for weed invasion in native vegetation[J]. *Plant Protection Quarterly*, 1991, 6: 99—104.
- [9] 林慧龙, 龙瑞军, 任继周. 放牧侵蚀研究回顾与展望[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2222—2227.
- [10] 石红霄. 过度放牧下高原早熟禾矮小化及其形成机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [11] 张林, 罗天祥, 邓坤枚, 等. 云南松比叶面积和叶干物质含量随冠层高度的垂直变化规律[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(1): 40—44.
- [12] Niu K, Zhang S, Zhao B, *et al.* Linking grazing response of species abundance to functional traits in the Tibetan alpine meadow[J]. *Plant and Soil*, 2010, 330: 215—223.
- [13] Cingolani A M, Posse G, Collantes M B. Plant functional traits, herbivore selectivity and response to sheep grazing in Patagonian steppe grasslands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(1): 50—59.
- [14] Diaz S, Lavorel S, McIntyre S, *et al.* Plant trait responses to grazing—a global synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 313—341.
- [15] Meziane D, Shipley B. Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: effects of irradiance and nutrient availability[J]. *Plant, Cell, Environments*, 1999, 22: 447—459.
- [16] Poorter Hand de Jong R. A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity[J]. *New Phytologist*, 1999, 143: 163—176.
- [17] Garnier E, Shipley B, Roumet C, *et al.* Standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content[J]. *Functional Ecology*, 2001, 15: 688—695.
- [18] Zheng S X, Ren H Y, Lan Z C, *et al.* Effects of grazing on leaf traits and ecosystem functioning in Inner Mongolia grasslands: scaling from species to community[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(3): 1117—1132.
- [19] Diaz S, Lavorel S, McIntyre S, *et al.* Plant trait responses to grazing—a global synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 313—341.
- [20] Pakeman R J. Consistency of plant species and trait responses to grazing along a productivity gradient: a multi-site analysis[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(5): 893—905.
- [21] Graff P, Martín R, Chaneton E J. Shifts in positive and negative plant interactions along a grazing intensity gradient[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 188—199.
- [22] 安慧. 放牧干扰对荒漠草原植物叶性状及其相互关系的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 2991—2996.
- [23] 李岩瑛. 祁连山地区降水气候特征及其成因分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [24] 李文, 曹文侠, 师尚礼, 等. 放牧管理模式对高寒草甸生态系统有机碳、氮储量特征的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(11): 25—33.
- [25] 郑淑华, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同放牧压力下典型草原土壤物理性质与植被关系的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(7): 199—203.
- [26] 王苗利, 张靖雪, 郭光鹏, 等. 经纬度对中国野生狗牙根土壤养分的影响[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(5): 53—61.
- [27] Ruben Milla. The Leafing Intensity Premium Hypothesis Tested across Clades, Growth Forms and Altitudes[J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 972—983.
- [28] 徐帆, 蒋梦丹, 柴伟国, 等. 不同种源三叶青的农艺性状和品质性状的因子分析和聚类分析[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(3): 408—415.
- [29] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较[J]. *生态学报*, 2005, 25(2): 304—311.
- [30] 祝介东, 孟婷婷, 倪健, 等. 不同气候带间成熟林植物叶性状间异速生长关系随功能型的变异[J]. *植物生态学*

- 报, 2011, 35(7): 687-698.
- [31] 李西良, 侯向阳, 吴新宏, 等. 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(5): 440-451.
- [32] 张凤良, 张方秋, 潘文, 等. 17 个红锥种源叶片性状变异分析[J]. 广东林业科技, 2011, 27(3): 20-26.
- [33] Wilson P J, Thompson K, Hodgson J G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies[J]. *New Phytologist*, 2010, 143(1): 155-162.
- [34] 赵娜, 赵新全, 赵亮, 等. 植物功能性状对放牧干扰的响应[J]. 生态学报, 2016, 35(7): 1916-1926.
- [35] 朱瑞清, 刘美玲, 李刚, 等. 2 种水分生境下红砂叶片功能性状的响应及适应机制[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 29-34.
- [36] Dijkstra P, Lambers H. Plant analysis of specific leaf area and photosynthesis of two inbred lines of *Plantago major* differing in relative growth rate[J]. *New Phytologist*, 2010, 113(3): 283-290.
- [37] 杨鑫, 孙宇杰, 周碧江, 等. 中国现有葡萄品种叶片形态评价与分析[J]. 北方园艺, 2021(1): 23-29.
- [38] 刘红梅, 李洁, 于丽, 等. 养分添加对贝加尔针茅草原 6 种植物叶片性状的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(5): 81-91.
- [39] 施宇, 温仲明, 龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [40] Fleming P A, Anderson H, Prendergast A S, *et al.* Is the loss of Australian digging mammals contributing to a deterioration in ecosystem function[J]. *Mammal Review*, 2013, 44(2): 94-108.

Comparison of leaf functional traits of common dominant species in alpine meadow under different grazing management modes

YANG Jing^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, FANG Qing-hui^{1,2}, LU Yan^{1,2}, ZHANG Caijun^{1,2},
YAO Bao-hui^{1,2}, SUN Xiao-mei^{1,2}, SU Jun-hu^{1,2}

(1. College of Grassland Science, College of Resources and Environment, Key Laboratory of Grassland Ecosystem (Ministry of Education), Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing land Ecosystem Sustainability, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
2. Gansu Agricultural University-Massey University Research Centre for Grassland Biodiversity, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study selected four common dominant species including *Elymus nutans*, *Kobresia humilis*, *Medicago ruthenica* and *Potentilla anserina* under four different modes of grazing management, i. e., traditional continuous grazing (CG), alpine meadow grazing (TG), growing season grazing given (GSG) and grazing prohibition (PG). Leaf characteristics including leaf length, leaf width, leaf perimeter, leaf area and specific leaf area (SLA) were analyzed. The aim was to provide reference for grazing management of alpine meadow. The results showed that the leaf length, leaf circumference and leaf area of *E. nutans* followed the order of GSG > PG > TG > CG, the SLA performance as the order of CG > PG > TG > GSG. Compared with the CG management model, the leaf area of *K. humilis* of GSG, TG and PG reduced by 40.13%, 56.06% and 61.83%, respectively, while its SLA followed the order of TG > GSG > TG > CG. Leaf length, leaf perimeter and leaf area of *P. anserina*, togeth-

er with leaf perimeter, leaf area and SLA of *M. ruthenica* showed an order of GSG>P G>TG>CG. The variation coefficient of leaf traits showed that *E. nutans* had stronger plasticity in leaf width and SLA; *K. humilis* had stronger plasticity in leaf area; *M. ruthenica* had stronger plasticity in leaf width; while *P. anserine* had the strongest plasticity in SLA and leaf area. Pearson correlation analysis showed that soil compactness and soil organic matter significantly affected leaf functional traits under grazing management. The comprehensive comparison among species showed that the plasticity in leaf functional traits was an important factor for the adaptation of plants to degraded alpine meadows.

Key words: grazing management model; leaf functional traits; specific leaf area; correlation

