

狼毒对西藏高原高寒草甸退化的指示作用*

王福山^{1,2} 何永涛^{1,2**} 石培礼^{1,2} 牛犇^{1,2} 张宪洲^{1,2} 徐兴良¹

¹中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 拉萨高原生态试验站 北京 100101

²中国科学院大学 北京 100049

摘要 局部草甸退化是西藏高原面临的主要生态问题, 狼毒在高寒退化草甸中的入侵、扩散也日益严重, 已经成为退化草甸中主要的毒杂草之一。为了解狼毒对高寒草甸退化程度的指示作用, 在西藏当雄县草原站选择3处不同退化程度的高寒草甸群落, 调查植物群落组成, 并测定各群落表层土壤的理化指标。结果显示: 随着狼毒分布增加, 草甸呈逐步退化的态势, 一方面, 草甸群落的优势物种组成从以牧草为主转变为以毒杂草为主, 狼毒盖度、地上生物量及重要值逐渐增加, 而禾本科、莎草科等优良牧草的盖度、地上生物量以及重要值逐渐降低; 另一方面, 草甸表层土壤表现出贫瘠化的趋势, 土壤有机质、全氮含量、土壤含水量均显著降低, 无机氮(硝态氮、氨态氮)也呈降低的趋势, 而pH值、土壤容重则呈增加趋势。狼毒盖度及地上生物量与牧草地上生物量、土壤全氮、有机碳及土壤含水量呈显著的负相关($P < 0.05$), 而与土壤容重和pH值呈极显著正相关($P < 0.01$)。因此, 较易测定的狼毒盖度及地上生物量能较好地指示当雄草原化草甸的退化程度, 可作为判定草甸退化程度的指标。(图3 表2 参27)

关键词 狼毒; 群落组成; 土壤养分; 草甸退化; 西藏高原

CLC S812.68 (275)

Stellera chamaejasme as an indicator for alpine meadow degradation on the Tibetan Plateau*

WANG Fushan^{1,2}, HE Yongtao^{1,2**}, SHI Peili^{1,2}, NIU Ben^{1,2}, ZHANG Xianzhou^{1,2} & XU Xingliang¹

¹Lhasa Plateau Ecological Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Local grassland degradation has become the main ecological issue on the Tibetan Plateau. The degraded alpine meadows in northern Tibetan Plateau have been seriously invaded by *Stellera chamaejasme*, one of the main noxious and unpalatable herbs. This research aimed to understand its role as an indicator for degradation of alpine meadows. Three communities of alpine meadow at different degradation stage were investigated in Damxung Grassland Station in the northern Tibetan Plateau. The species composition, biomass and soil physical-chemical features were sampled and measured. The investigation found that with the increasing of *S. chamaejasme*, the alpine meadow had been gradually degraded. The dominant species changed from grasses and sedges to noxious herbs. The coverage, aboveground biomass and important value of *S. chamaejasme* increased significantly. In contrast, those of grasses and sedges gradually decreased. The top soil organic matter, soil water content and total N significantly declined; the available inorganic nitrogen also showed a decreasing trend; soil pH and bulk density increased with degradation levels. Further regression analysis indicated a significant negative relationship between the coverage, aboveground biomass of *S. chamaejasme* and the aboveground biomass of herbage, soil organic matter, total N and soil moisture content, and a significant positive relationship between the coverage, aboveground biomass of *S. chamaejasme* and the soil pH value and soil bulk density. Our results suggested that the cover and aboveground biomass of *S. chamaejasme*, which are relatively easy to measure, can be good indicators for the degradation of alpine meadows on the northern Tibetan Plateau.

Keywords *Stellera chamaejasme*; community composition; soil nutrients; alpine meadow degradation; Tibetan Plateau

收稿日期 Received: 2016-03-13 接受日期 Accepted: 2016-04-13

*中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030401)、中国科学院特色研究所培育建设服务项目(TSYSJ05)和国家自然科学基金项目(41271067)资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDB03030401), the Construction Service Program for Cultivating Unique Institution of the Chinese Academy of Sciences(TSYSJ05) and the National Natural Science Foundation of China(41271067)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: heyt@igsnrr.ac.cn)

青藏高原是我国重要的生态安全屏障区域,受超载过牧和气候变暖的影响,局部高寒草地退化已经成为青藏高原面临的主要生态问题之一^[1]。资料显示,在20世纪90年代青藏高原退化草地的总面积就已经达到 $4.25 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占可利用草地的32.7%^[2],其中高寒草甸退化草地面积约 $1.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$;而最近的卫星遥感监测结果表明,2000年以来重度退化草地面积增加趋势明显,其中极严重退化草地扩展速度最快,由0.5%增长到2.2%^[3]。目前对退化草地的研究主要集中在退化面积及速度的计算等方面,对退化标准和指标的研究仍较少。

关于草地退化程度的诊断标准,国内外均没有统一的指标体系。早在20世纪50年代之前,国外就采用过土壤有机质、可利用牧草产量百分比、植被群落的盖度及地上部分生物量等诊断指标;而我国任继周院士则采用以草地植物经济类群和特征植物、地标状况、水土流失现象、土壤有机质和酸度为指标的综合判断法^[4]。刘钟龄等将植物群落生物产量、优质草种群产量、可食植物产量、株丛高度、群落盖度下降率、退化演替指示植物增长率、轻质土壤侵蚀程度、中重质土壤容重硬度增高、可恢复年限等10个指标作为退化程度的鉴定指标^[5]。上述评价鉴定指标虽然全面详尽,但过于繁琐、复杂。基于单个草甸退化指示物种的分布状况和生物量的变化来方便、快捷地判断草地退化程度的研究还鲜见报道。

狼毒(*Stellera chamaejasme*)是退化高寒草地中的常见种,尤其在严重退化的草地中常为优势种^[6]。狼毒隶属于瑞香科狼毒属,自上世纪60年代开始就在青藏高原退化草地中入侵、扩散^[7],是高寒退化草地中主要的毒杂草种类之一。原本以嵩草属植物为建群种或优势种的草甸群落逐渐被狼毒等毒杂草所取代^[8],优良牧草产量显著下降,严重阻碍地区畜牧业的发展^[9]。调查结果表明,狼毒目前已经分布于西藏的大部分地区,在退化草地中平均密度为 6.45 株丛/m^2 ,最高密度为 12.5 株丛/m^2 ,最低密度为 0.1 株丛/m^2 ^[10]。在过度放牧及气候变化的背景下,狼毒在退化草地中的危害面积还在不断地扩散蔓延^[11]。故我们推测,单个狼毒植物或许可以作为指示高寒草甸退化程度的指标之一。因此,本文以西藏当雄县3处不同退化程度的高寒草甸群落为例,通过分析草甸群落物种组成和土壤理化特征的差异以及狼毒盖度、地上部分生物量与牧草地上生物量、土壤属性之间的相互关系,探讨该区域狼毒对草甸退化程度的指示作用,为判断草甸健康状况提供一个更方便、快捷的途径,为制定退化草甸生态恢复和管理措施提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于西藏自治区当雄县草原站($91^{\circ}05'E$, $30^{\circ}51'N$;海拔4 333 m),属于大陆性高原季风气候,具有太阳辐射强、气温低、温度日较差悬殊等特点。多年平均气温 1.3°C ,最冷月(1月)均温 -10.4°C ,最热月(7月)均温 10.7°C ,冰冻期3个月(11月到次年1月)。多年平均降水量476.8 mm,其中85.1%集中在6-8月,雨热同期,干湿季明显。土壤类型为高

寒草甸土,砂壤质地,厚度在0.1-0.3 m之间^[12]。该区域地处湿润区向半干旱区过渡地带,地带性植被属于高山嵩草草甸,建群种包括高山嵩草(*Kobresia pygeama*)、窄叶苔草(*Carex montis-everestii*)、丝颖针茅(*Stipa capillacea*)等,并伴生线叶嵩草(*K. capillifolia*)等密丛莎草及木根香青(*Anaphalis xylorhiza*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)等杂类草^[13-14]。近年来,受草甸本身生产性能低以及草畜矛盾突出等因素影响,该区域草甸出现了不同程度的退化,以狼毒为主的毒杂草在植物群落中日益增多^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2014年8月,在植物生长盛期,在当雄草原站附近,选择3处高寒草甸群落作为调查样地,样地大小为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。3处样地位于同一水平带上,地形平坦,间隔约1 500 m。参考《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》(GB 19377-2003)^[16],并结合3个样地植被、土壤调查状况,划分了3个样地退化程度,分别为轻度、中度及重度退化高寒草甸。轻度和中度退化草甸为当雄草原站的冬季牧场,而重度退化草甸为附近村落的牧民集体所有,为自由放牧草场。

1.2.2 野外调查与取样 在3处样地内分别随机选取5个 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的样方,用细绳将样方框均匀分成100个 25 cm^2 栅格,以栅格确定草甸群落的总盖度及每种植物的分盖度;每个物种随机选取5株,测量高度求平均值,作为株高;齐地面、分物种剪取样方内所有植物的地上部分,装入信封内带回实验室,置于 65°C 烘箱内烘干称重,作为植物的地上部分生物量^[13]。

在3个样地中用土钻随机取3钻土样混合成一个土样,取样深度为0-15 cm,每个样地取5个混合土样。取回的混合土样拣出植物根系后分为2部分,一部分用于土壤含水量、无机氮(氨态氮和硝态氮)的测定,另一部分风干后过筛用于测定土壤有机质、全氮、pH等理化指标。土壤容重测定采用环刀(体积 100 cm^3)法,在3个样地中分别采集4个表层(0-15 cm)土壤样品,共12个,放入铝盒内密封带回实验室测定^[17]。

1.2.3 室内测定 土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法-外加热法^[18];全氮用Vario MACRO cube元素分析仪测定^[19];土壤含水量和土壤容重采用烘干法测定;土壤pH采用1:2.5水土比以pH计测定;无机氮(NH_4^+ 和 NO_3^-)含量用全自动连续流动分析仪(AA3型,Seal公司生产,Germany)测定^[17]。以上测定均在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析测试中心进行。

1.2.4 植物类群划分及重要值计算 将调查群落中的植物类群分为两大类:杂草及牧草。杂草主要包括狼毒、沙蒿(*Artemisia desteriorum*)、木根香青、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、马先蒿(*Pedicularis ikomai*)、蒲公英(*Taraxacum officinalis*)、黄芩(*Astragalus membranaceus*)等;牧草主要包括禾本科、莎草科两类植物^[13]。各植物种的重要值(IV)按以下公式计算:重要值=[(相对盖度+相对高度+相对地上生物量)/3] $\times 100$ 。

1.2.5 数据统计与分析 数据通过SPSS 13.0进行统计检验,用One-way ANOVA分析各指标在不同退化程度草甸群落中的差异显著性,采用线性回归分析狼毒盖度及牧草地上生

物量与草甸群落各退化指标之间的相关性, 显著性水平为 $P < 0.05$.

2 结果

2.1 草甸群落物种组成变化

随着狼毒分布的增加, 3个不同退化程度高寒草甸群落物种组成表现出明显差异(表1). 轻度、中度、重度退化草甸狼毒盖度分别为0、6.4%和11.6%, 群落总盖度分别为60%、50.6%以及39.4%. 在无狼毒的轻度退化草甸群落中, 物种数为6, 植物种类组成以牧草为主, 其盖度占总盖度的56%, 其中丝颖针茅的盖度及重要值最大, 其次为莎草科的小嵩草及苔草. 中度退化草甸中, 物种数为16, 毒杂草的比例明显增加, 沙蒿的盖度和重要值均最大, 其次是狼毒, 重要值达13.8; 而牧草中的丝颖针茅、苔草、高山嵩草盖度及重要值显著下降, 重要值之和只有13.2, 低于狼毒的重要值. 在重度退化草甸群落中, 群落物种数为16, 狼毒的重要值最大, 沙蒿次之, 两者盖度之和占群落总盖度的43%, 而丝颖针茅、苔草、小嵩草等牧草的盖度之和仅占群落总盖度的13%.

2.2 草甸群落地上生物量

地上生物量的数据(图1)显示, 随着狼毒分布的增加, 草甸中牧草地上生物量明显下降, 轻度、中度及重度退化草甸牧草地上生物量分别为20.1 g/m²、16.2 g/m²及13.1 g/m², 且轻度与重度退化草甸达到了极显著差异水平($P < 0.01$); 从牧草地上生物量占总地上生物量的比例来看, 轻度退化草甸所占比例高达43%, 中度、重度退化草甸中牧草所占比例则分别仅为22%和8.4%. 而狼毒地上生物量所占的比例则显著

增加, 从中度退化草甸中的14.9%增加到重度退化草甸中的36%. 杂草和总地上生物量的变化趋势一致, 都是中度退化草甸的生物量最大, 轻度次之, 重度最小.

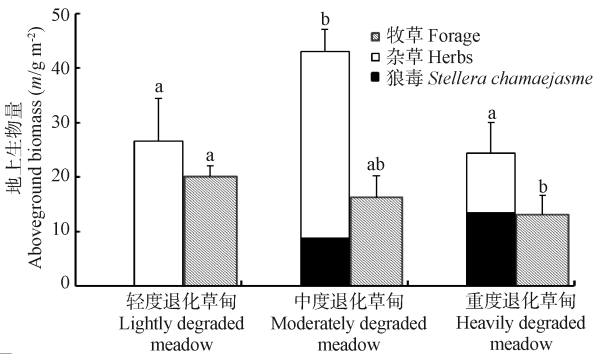


图1 不同退化程度高寒草甸群落地上生物量. 不同字母表示不同退化程度间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 1 Aboveground biomass in alpine meadow of different degradation stages. Lowercase letters indicate significant differences among degradation stages at 0.05 level.

2.3 表层土壤理化特征

表层土壤理化指标分析结果(表2)表明, 随着狼毒分布的增加, 草甸表层土壤中的有机碳、全氮以及土壤含水量明显下降, 无机氮(氨态氮和硝态氮)呈下降趋势, 而pH值和土壤容重则呈增加趋势. 有机碳在轻度退化草甸中最高(1.7%), 其次是中度退化草甸(1.5%), 而在重度退化草甸只有1.2%, 较之轻度退化、中度退化草甸分别下降了31.2%、21.8%, 且均与两者达差异显著水平($P < 0.05$). 全氮的含量随退化程度增加从0.16%显著下降到0.12% ($P < 0.05$), 轻度

表1 当雄不同退化程度高寒草甸群落物种组成

Table 1 Plant community composition in Damxung alpine meadows of different degradation stages

植物类群 Plant group	植物名称及拉丁名 Name and Latin name	轻度退化草甸 Lightly degraded meadow		中度退化草甸 Moderately degraded meadow		重度退化草甸 Heavily degraded meadow	
		分盖度 (r/%) Coverage	重要值 Important value	分盖度 (r/%) Coverage	重要值 Important value	分盖度 (r/%) Coverage	重要值 Important value
杂草 Herbs	狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>			6.4	13.8	11.6	27.8
	沙蒿 <i>Artemisia dosterorum</i>			12.8	21	5.4	13.5
	木根香青 <i>Anaphalis xylorhiza</i>	6	14.7	4.4	9.5	0.6	1.7
	黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i>			1.2	2.5	0.6	2
	阿尔泰狗娃花 <i>Aster tataricus</i>	14	20				
	马先蒿 <i>Pedicularis ikomai</i>			0.2	2.3	1.2	3.8
	蒲公英 <i>Taraxacum officinalis</i>					1.2	2.5
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	7.6	12	6.4	7.9		
	雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>			1.2	2.8		
	楔叶委陵菜 <i>Potentilla cuneata</i>			1.2	1.9		
	蓼 <i>Polygonum sp.</i>			0.4	0.4		
	紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i>			0.2	2.5	1.4	4.3
	苔草 <i>Carex tristachya</i>	8	15.3	4.4	7.1	3.6	7.1
	早熟禾 <i>Poa annua</i>			9.6	14.8	0.6	5.7
牧草 Forage	西藏点地梅 <i>Androsace mariae</i>			2	2	0.4	0.9
	羊茅 <i>Festuca ovina</i>					2.8	7.1
	羊草 <i>Leymus chinensis</i>					0.4	1.9
	丝颖针茅 <i>Stipa capillacea</i>	17.6	24	1.4	3	0.4	2.8
	高山嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>	8.2	13.6	1.6	3.2	1.4	3.3
	西藏梭子芹 <i>Pleurospermum hookeri</i>			0.4	0.5	8	11
	兰石草 <i>Lancea tibetica</i>			2.2	3	2.2	5.7
	群落总盖度 Total community coverage (r/%)	60		50.6		39.4	

退化草甸中无机氮含量(硝态氮和氨态氮)显著高于其他两处退化草甸($P < 0.05$),土壤容重从 1.36 g/cm^3 显著增加到 1.45 g/cm^3 ($P < 0.05$), pH值从 6.78 显著增大到 6.85 ($P < 0.05$).

2.4 狼毒盖度和地上生物量与草甸退化指标的相关性

随着狼毒盖度及地上生物量不断增加,草甸退化程度加剧,土壤养分含量明显降低、土壤容重逐步增大,牧草地上生物量也显著降低.选取狼毒盖度及地上生物量为指标,分别与牧草地上生物量、全氮、有机碳、土壤容重、土壤含水量及pH进行回归分析.结果表明,狼毒盖度与有机碳、土壤含水量及牧草地上生物量呈极显著负相关($P < 0.001$),与全氮呈显著负相关($P < 0.05$),而与土壤容重、pH值呈极显著正相关($P < 0.01$) (图2);狼毒地上生物量与有机碳、土壤含水量呈极显著负相关($P < 0.001$),与全氮、牧草地上生物量呈显著负相关($P < 0.05$),而与土壤容重、pH值呈极显著正相关($P < 0.01$) (图3).

3 讨论

本文中狼毒盖度及地上生物量与表征草甸退化指标表现出了显著的相关性(图2、图3),即随着狼毒增加,草甸的退化程度加剧.赵成章等对狼毒型退化草地植被群落演替

特征的研究结果也表明,伴随着狼毒分盖度的增加,草地群落中牧草的地上生物量和重要值明显下降,草地退化程度增大^[20].周华坤等在研究黄河源区高寒草甸草原的退化特征时发现,随着高寒草甸退化程度加剧,土壤湿度、土壤有机质、硝态氮的含量都减小,贫瘠化程度不断加剧^[21].本文的研究结果表明,较易测定的狼毒盖度及地上生物量可作为判定高寒草甸退化程度的指标.

草甸退化是植被与土壤的协同退化,两者互为因果^[18, 22].在狼毒等毒杂草未出现的草甸中,草甸的植物组成以莎草科和禾本科的优良牧草为主(图1),土壤质量状况在3个退化草甸群落中也最为良好,草甸处于轻度退化状态;随着狼毒分布盖度增大到 6.4% ,地上生物量为 8.8 g/m^2 时,毒杂草比例显著增加,植被覆盖度、优良牧草产量及比例明显下降,土壤质量状况相比于轻度退化草甸也明显下降,草甸处于中度退化状态;当狼毒分布盖度进一步增至 11.6% ,地上生物量为 13.5 g/m^2 时,狼毒由伴生种逐步演变为草甸群落的绝对优势种,土壤质量状况最为贫瘠化,草甸处于重度退化状态.可见,狼毒的分布状况较好地指示了西藏高寒草甸的退化程度.

狼毒分布与草甸退化程度密切相关,在轻度退化草甸中常为偶见种,而在重度退化草甸中常为建群种或优势种^[4].这

表2 当雄不同退化程度高寒草甸土壤特征
Table 2 Soil nutrients characteristic of Damxung alpine meadow in different degradation stages

退化程度 Degradation degree	pH	土壤含水量 Soil moisture content (w/%)	土壤容重 Soil bulk density ($\rho/\text{g cm}^{-3}$)	有机碳 Organic C (w/%)	全氮 Total N (w/%)	硝态氮 NO_3^- (w/mg kg^{-1})	氨态氮 NH_4^+ (w/mg kg^{-1})
轻度退化 Lightly degraded	$6.78 \pm 0.021\text{a}$	$20.4 \pm 3.54\text{a}$	$1.36 \pm 0.02\text{a}$	$1.72 \pm 0.11\text{a}$	$0.16 \pm 0.02\text{a}$	$1.09 \pm 0.24\text{a}$	$5.25 \pm 1.17\text{a}$
中度退化 Moderately degraded	$6.79 \pm 0.021\text{a}$	$14.9 \pm 0.79\text{b}$	$1.39 \pm 0.01\text{a}$	$1.51 \pm 0.20\text{a}$	$0.15 \pm 0.005\text{ab}$	$0.67 \pm 0.19\text{b}$	$3.25 \pm 0.19\text{b}$
重度退化 Heavily degraded	$6.85 \pm 0.026\text{b}$	$13.6 \pm 1.96\text{b}$	$1.45 \pm 0.02\text{b}$	$1.18 \pm 0.14\text{b}$	$0.12 \pm 0.02\text{b}$	$0.83 \pm 0.17\text{b}$	$3.31 \pm 0.15\text{b}$

表中数据为平均值±标准差 ($N=3-5$), 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$).
Data are mean ± standard deviation. Lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

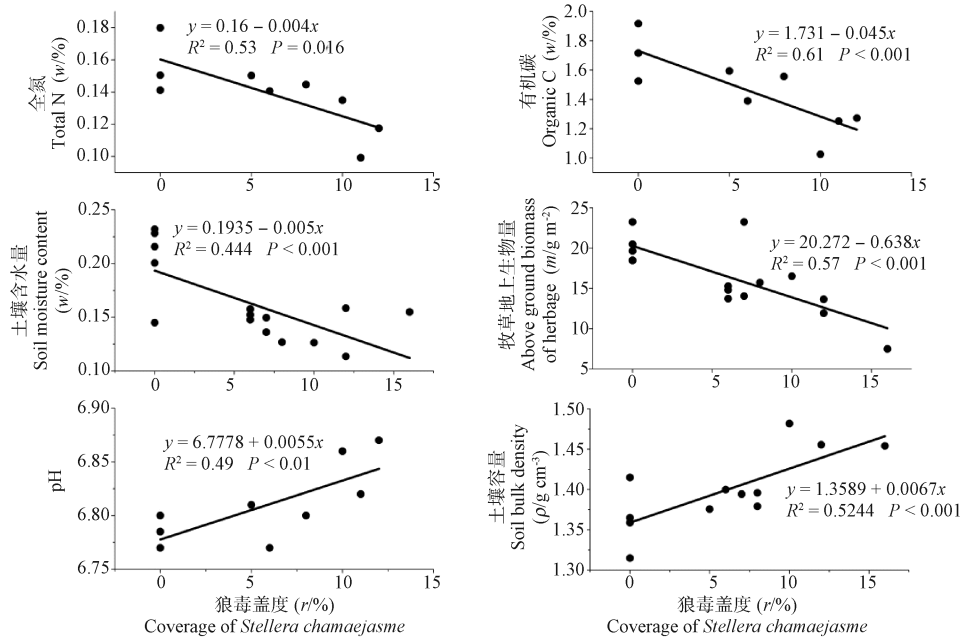


图2 狼毒盖度与土壤理化性质及牧草地上生物量的相关性。
Fig. 2 Relationship of coverage of *Stellera chamaejasme* with soil characteristics and aboveground forage biomass.

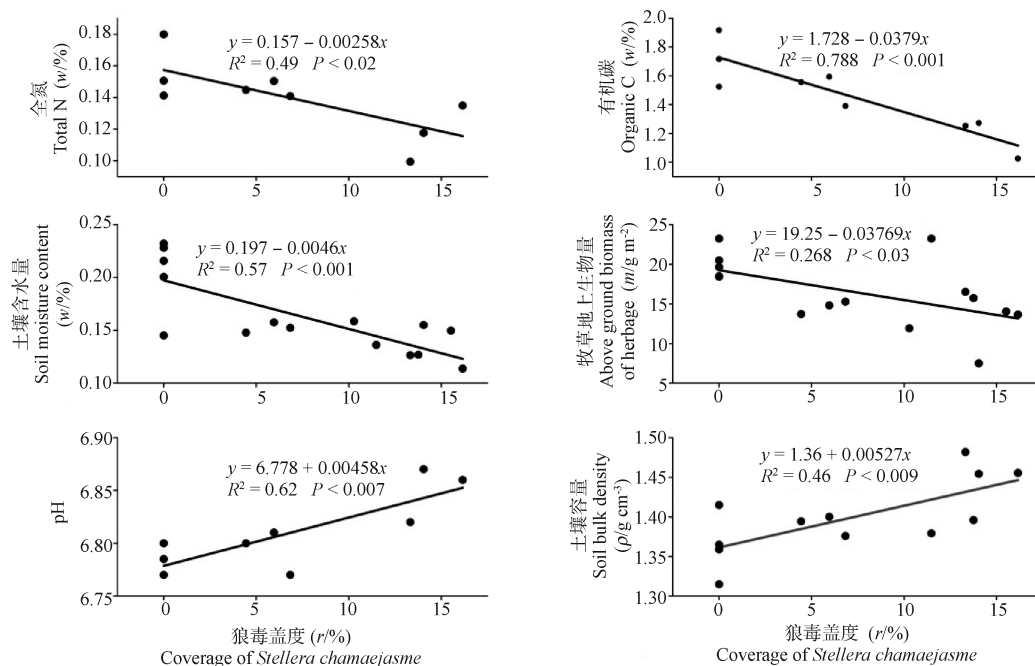


图3 狼毒地上生物量与土壤理化性质及牧草地上生物量的相关性。

Fig. 3 Relationship of the aboveground biomass of *Stellera chamaejasme* with soil characteristics and aboveground forage biomass.

与狼毒的生态策略不无联系。首先,狼毒具备很强的化感作用,限制其它植物种子的萌发、胚芽和胚根伸长,影响牧草的建植与分布^[23],牧草产量及所占比例显著下降,而狼毒的分布却不断增加(图1)。其次,退化严重的草甸群落,地表裸露,形成大量空余生态位,狼毒可凭借强的群落幼苗更新能力,迅速占据空余生态位,形成高密度的狼毒群落^[24]。再者,狼毒根系发达,主根粗壮,能充分利用土壤水,且根系具备向水性,极易适应土壤干旱的退化草甸^[25],在本研究中也发现重度退化草甸土壤含水量最低,但狼毒分布却占据优势地位。

明确草甸退化程度,对于草甸生态恢复措施的制定具有重要意义^[26]。对于轻度或中度退化的草甸,其生态恢复措施主要为围栏封育、灭除杂草及施肥等,而对于重度退化草甸的恢复措施,主要为人工建植、补播等^[27]。狼毒分布(盖度及地上部分生物量)与退化程度间的密切关系,为明确草甸退化程度提供了一种简便的方法,从而可为西藏高寒草甸的生态恢复工作提供依据。

4 结论

在西藏当雄地区的研究结果表明,该地区草甸退化具体表现为植被结构趋向于稀疏化,组成种类中毒杂草所占比例增加,牧草产量减少以及土壤贫瘠化发展趋势加强,而狼毒的盖度及地上生物量与群落中物种组成变化以及土壤理化特征等草甸退化指标均表现出了很好的相关性,较好地指示了高寒草甸的不同退化程度,可作为判定草甸退化程度的简易指标。

参考文献 [References]

- 崔庆虎, 蒋志刚, 刘季科, 苏建平. 青藏高原草地退化原因述评[J]. 草业科学, 2007, 24 (5): 20-26 [Cui QH, Jiang ZG, Liu JK, Su JP. A review of the cause of rangeland degradation on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Pratacult Sci*, 2007, 24 (5): 20-26]
- 贺有龙, 周华坤, 赵新全. 青藏高原高寒草地的退化及其恢复[J]. 草业与畜牧, 2008 (11): 1-9 [He YL, Zhou HK, Zhao XQ. Alpine grassland degradation and its restoration on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Pratacult Ani Husb*, 2008 (11): 1-9]
- 高清竹, 李玉娥, 林而达. 藏北地区草地退化的时空分布特征[J]. 地理学报, 2005, 60 (6): 965-973 [Gao QZ, Li YE, Lin ED. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in Northern Tibet [J]. *Acta Geogr Sin*, 2005, 60 (6): 965-973]
- 辛玉春, 杜铁英. 青海省天然草地退化程度分级指标初探[J]. 青海草业, 2013, 22 (1): 19-32 [Xin YC, Du TY. A preliminary study on indexes of natural grassland and degradation classification in Qinghai [J]. *Qinghai Pratacult*, 22 (1): 19-32]
- 刘钟龄, 王伟, 梁存柱, 郝敦元. 内蒙古草原植被在持续牧压下退化演替的模式与诊断[J]. 草地学报, 1998, 6 (4): 244-251 [Liu ZL, Wang W, Liang CZ, Hao DY. The regressive succession patten and its diagnostic of Inner Mongolia Steppe in sustained and superstrong grazing [J]. *Acta Agres Sin*, 1998, 6 (4): 244-251]
- 刑福, 王正文. 科尔沁草地有毒植物及保障家畜安全的对策[J]. 草业学报, 2000, 9 (3): 66-73 [Xing F, Wang ZW. Poisonous plants in Kerqin grassland and strategy to secure safety for livestock [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2000, 9 (3): 66-73]
- Sun G, Luo P, Wu N, Qiu PF, Gao YH, Chen H, Shi FS. *Stellera chamaejasme* L. increases soil N availability, turnover rates and microbial biomass in an alpine meadow ecosystem on the eastern Tibetan Plateau of China [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41 (1): 86-91

- 8 兰玉蓉. 青藏高原高寒草甸草地退化现状及治理对策[J]. 青海草业, 2004, **13** (1): 27-30 [Lan Y. The degradation problem and strategy of alpine meadow in qingzang plateau [J]. *Qinghai Pratacult*, 2004, **13** (1): 27-30]
- 9 邢福, 宋日. 草地有毒植物狼毒种群分布格局及动态[J]. 草业科学, 2002, **19** (1): 16-19 [Xing F, Song R. Population distribution pattern and dynamics of poisonous *Stellera chamaejasme* on grassland [J]. *Pratacult Sci*, 2002, **19** (1): 16-19]
- 10 覃荣, 王保海, 王翠玲, 王文峰, 姚晓波, 扎罗, 达次. 西藏瑞香狼毒的研究及综合利用前景[J]. 西藏科技, 2007 (10): 8-15
- 11 刘英, 龙瑞军, 姚拓. 草地狼毒研究进展[J]. 草业科学, 2004, **21** (6): 55-61 [Liu Y, Long RJ, Yao T. Research progress on *Stellera chamaejasme* L. in grassland [J]. *Pratacult Sci*, 2004, **21** (6): 55-61]
- 12 Ma WL, Shi PL, Li WH, He YT, Zhang XZ, Shen ZX. The change of individual plant traits and biomass allocation in alpine meadow with elevation variation on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sci China Life Sci*, 2010, **40** (6): 533-543
- 13 宗宁, 石陪礼, 蒋婧, 孟丰收, 马维玲, 熊定鹏, 宋明华, 张宪洲. 施肥和围栏封育对退化高寒草甸植被恢复的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (6): 905-913 [Zong N, Shi PL, Jiang J, Meng FS, Ma WL, Xiong DP, Song MH, Zhang XZ. Effects of fertilization and graving exclosure on vegetation recovery in a degraded alpine meadow on Tibetan Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (6): 905-913]
- 14 Shi PL, Sun XL, Xu LL, Zhang XZ, He YT, Zhang DQ, Yu GR. Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Sci China Series D Earth Sci*, 2006, **49** (Suppl. 2): 207-218
- 15 杜小娟, 程积民. 西藏当雄县草地退化成因分析及开发利用研究[J]. 安徽农业科学, 2007, **35** (19): 5853-5854 [Du XJ, Cheng JM. Analysis of formation causes of grassland degradation in Damxung County of Tibet and its exploitation and utilization [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2007, **35** (19): 5853-5854]
- 16 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 19377-2003 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003
- 17 宗宁, 石培礼, 蒋婧, 宋明华, 孟丰收, 熊定鹏, 张宪洲, 沈振西. 浅耕对西藏高原退化草甸土壤和植物群落特征的影响[J]. 草业科学, 2014, **31** (1): 8-14 [Zong N, Shi PL, Jiang J, Song MH, Meng FS, Xiong DP, Zhang XZ, Shen ZX. Effects of shallow plowing on soil and plant community of degraded alpine meadow in Tibetan plateau [J]. *Pratacult Sci*, 2014, **31** (1): 8-14]
- 18 王长庭, 龙瑞军. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14** (2): 225-230 [Wang CT, Long RJ. Changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon at different degradation successional stages of alpine meadows in the Headwater Region of Three Rivers in China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2008, **14** (2): 225-230]
- 19 He YT, Xu, XL, Kueffer, C, Zhang, XZ, Shi, PL. Leaf litter of a dominant cushion plant shifts nitrogen mineralization to immobilization at high but not low temperature in an alpine meadow [J]. *Plant Soil*, 2014, **383** (1-2): 415-426
- 20 赵成章, 樊胜岳. 祁连山区退化草地植被群落结构特征的研究[J]. 中国草地, 2004, **26** (2): 26-35 [Zhao CZ, Fan SY. Study on the vegetation community's structure of degraded of degraded grassland in Qilian Mountain [J]. *Grassl China*, 2004, **26** (2): 26-35]
- 21 周华坤, 赵新全. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征[J]. 草业学报, 2012, **21** (5): 1-11 [Zhou HK, Zhao XQ. The characteristics of soil and vegetation of degenerated alpine steppe in the Yellow River Source Region [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2012, **21** (5): 1-11]
- 22 张乃莉, 郭继勋. 松嫩草甸不同退化程度生境土壤磷素动态研究[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12** (6): 777-782 [Zhang NL, Guo JX. Dynamics of soil phosphorus in differently degraded habitats of the Songnen Meadow [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2006, **12** (6): 777-782]
- 23 程晓月, 后源, 任国华, 邓斌, 赵景学, 尚占环. “黑土滩”退化高寒草地6种常见毒杂草水浸液对垂穗披碱草的化感作用[J]. 西北植物学报, 2011, **31** (10): 2057-2064 [Cheng XY, Hou Y, Ren GH, Deng B, Zhao JX, Shang ZH. Alleopathic effects of aqueous extracts from “Black Soil Patch” poisonous weeds on *Elymus nutans* in degraded alpine meadow [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2011, **31** (10): 2057-2064]
- 24 尚占环, 龙瑞军, 马玉寿, 丁路明. 青藏高原“黑土滩”次生毒杂草群落成体植株与幼苗空间异质性及相似性分析[J]. 植物生态学报, 2008, **32** (5): 1157-1165 [Shang ZH, Long RJ, Ma YS, Ding LM. Spatial heterogeneity and similarity of adult plants and seedlings in “Black Soil Land” secondary weed community, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2008, **32** (5): 1157-1165]
- 25 孙建, 王小丹, 程根伟, 陈有超, 范继辉. 狼毒根系的向水性及其对河流侵蚀的响应[J]. 山地学报, 2014, **32** (4): 444-452 [Sun J, Wang XD, Cheng GW, Chen YC, Fan FW. Hydrotropism of *Stellera chamaejasme* roots and its response to the deposition of ephemeral stream along a hillslope [J]. *J Mount Sci*, 2014, **32** (4): 444-452]
- 26 Wu GL, Liu ZH, Zhang L, Chen, JM, Hu TM. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China [J]. *Plant Soil*, 2010, **332** (1): 331-337
- 27 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 施建军, 董全民. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. 草业科学, 2002, **19** (9): 1-4 [Ma YS, Lang BN, Li QY, Shi JJ, Dong QM. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow river source region [J]. *Pratacult Sci*, 2002, **19** (9): 1-4]