

DOI: 10.5846/stxb201904150751

赵鸿怡,熊万友,岳海涛,杨苑君,曾昊,崔媛,黄晓霞,张勇.退化梯度上滇西北高寒草甸植物地上形态及生物量变化特征.生态学报,2020,40(16):5698-5707.

Zhao H Y, Xiong W Y, Yue H T, Yang Y J, Zeng H, Cui Y, Huang X X, Zhang Y. Changes of aboveground morphological traits and biomass of alpine meadows along a degradation gradient in Northwestern Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5698-5707.

退化梯度上滇西北高寒草甸植物地上形态及生物量变化特征

赵鸿怡¹,熊万友¹,岳海涛¹,杨苑君²,曾昊¹,崔媛¹,黄晓霞^{3,4},张勇^{1,*}

1 西南林业大学湿地学院,国家高原湿地研究中心,昆明 650224

2 云南农业大学水利学院,昆明 650201

3 云南大学地球科学学院,昆明 650091

4 云南大学云南省高校低纬高原大气环境与边界层过程重点实验室,昆明 650091

摘要:受气候暖干化和旅游干扰等因素影响,滇西北高寒草甸出现了明显的退化趋势。为探究滇西北高寒草甸退化过程中植物地上形态和生产力的变化规律,在香格里拉市依据游径宽度确定了 3 个草甸退化梯度:一级退化(R1),二级退化(R2)和对照(CK),并于 2018 年 7 月进行野外调查,获取禾本科、莎草科和杂类草 3 个功能群植物的株高、开展度、叶长、叶宽、叶片长宽比等地上形态指标及植株地上生物量数据,构建各功能群植物生存状态指数(Vegetation living state, VLS)。结果表明:1)禾本科植物的植株高度、植株开展度、叶片长度和叶片长宽比随退化程度增加而减小。莎草科植物的植株高度、叶片长度和叶片长宽比随退化程度增加而减小。杂类草植物的所有的地上形态指标均随退化程度增加而减小;2)随退化程度增加,3 个功能群植物的地上生物量均显著下降($P < 0.05$);3)随退化程度增加,禾本科、莎草科和杂类草植物的 VLS 均减小。退化梯度上 3 个功能群植物的 VLS 排序也发生了变化:CK 样地中植物 VLS 的排序为杂类草>莎草科>禾本科;R1 和 R2 样地中,莎草科植物的 VLS 显著高于禾本科和杂类草,但禾本科和杂类草植物之间的 VLS 没有显著差异;4)草甸植物 VLS 与植物地上生物量之间的线性回归关系随退化程度增加而减弱。研究表明不同功能群植物地上形态的差异性变化可能增加滇西北退化高寒草甸植物生产力预测的不确定性。

关键词:退化;高寒草甸;植物地上形态;滇西北

Changes of aboveground morphological traits and biomass of alpine meadows along a degradation gradient in Northwestern Yunnan Province

ZHAO Hongyi¹, XIONG Wanyou¹, YUE Haitao¹, YANG Yuanjun², ZENG Hao¹, CUI Yuan¹, HUANG Xiaoxia^{3,4}, ZHANG Yong^{1,*}

1 National Plateau Wetlands Research Center, College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China

3 School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

4 Key Laboratory of Atmospheric Environment and Processes in the Boundary Layer Over the Low-Latitude Plateau Region, Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract: There is an obvious degradation tendency of alpine meadows in Northwestern Yunnan Province (NYP) because of

基金项目:国家自然科学基金项目(31901394, 31560181, 31700635);云南省科技厅计划项目(2018FD046);云南省教育厅科学研究基金项目(2018JS338)

收稿日期:2019-04-15; 网络出版日期:2020-06-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhy930@swfu.edu.cn

climate change and disturbance of tourism activities. In order to identify the changes of aboveground morphological traits and biomass of plants in the process of meadow degradation in NYP, this study specified three degradation levels, i. e., degradation level 1 (R1), degradation level 2 (R2) and control check (CK), according to the width of tourism-caused paths. A field survey was conducted to obtain the data of height, lateral spread, leaf length, leaf width, blade aspect ratio and aboveground biomass of Gramineae, Cyperaceae and Forbs in late July 2018. A vegetation living state index (VLS) was constructed based on aboveground morphological traits indexes to describe a synthetic state of plants. The results showed that: 1) the height, lateral spread, leaf length and blade aspect ratio of Gramineae decreased along the degradation gradient. The height, leaf length and blade aspect ratio of Cyperaceae decreased along the degradation gradient. All of the five aboveground morphological traits of Forbs decreased along the degradation gradient. 2) Aboveground biomass of Gramineae, Cyperaceae and Forbs decreased along the degradation gradient. 3) The VLS of Gramineae, Cyperaceae and Forbs decreased along the degradation gradient. The VLS order of different functional groups in CK was Forbs>Cyperaceae>Gramineae. The VLS of Cyperaceae was higher than the VLS of Gramineae and Forbs in both R1 and R2. 4) The linear regression relationship between the VLS and aboveground biomass weakened along with degradation gradients. This study suggests that the variation of aboveground morphological traits among different functional groups may augment the uncertainty of the prediction of aboveground biomass in degraded alpine meadows in NYP.

Key Words: degradation; alpine meadow; aboveground morphological traits; Northwestern Yunnan Province

高寒草甸生态系统是青藏高原植被的主体,分布于青藏高原腹地及周围山地^[1-2],具有涵养水源、水土保持、生物多样性维持等功能^[3-4]。近年来,由于全球气候变化、人口增加、旅游干扰等自然和人为因素共同影响,高寒地区的高寒草甸生态系统结构逐渐趋于简单化、功能脆弱化^[5-7],草甸退化研究已成为国内外生态研究的热点之一^[8-9]。滇西北地处青藏高原东南部、横断山区核心地带^[10-11],位于长江经济带上游,是我国构建“两屏三带”绿色发展生态安全屏障中的“川滇生态屏障”,也是我国植物多样性最丰富的地区之一^[12]。滇西北海拔 3200 m 以上的迪庆藏区分布着大量不连片分布的高寒草甸,这些高寒草甸对保障区域生态安全、维持当地牧民生计具有重要意义。近年来,滇西北地区气候暖干化趋势明显^[13],旅游业取得了长足发展^[14]。气候变化背景下的旅游干扰已成为导致滇西北高寒草甸退化的重要原因^[15-16]。高寒草甸保护和退化治理是实现滇西北牧区畜牧业和旅游业可持续发展、实现迪庆藏区精准脱贫的重要保障。但是目前对滇西北高寒草甸退化的研究不足。

研究表明,植被具有一定的抗踩踏能力,其中植被的抗干扰能力主要体现于踩踏后植物功能性状的损失及植株存活率^[17]。踩踏干扰对草甸土壤具有压实作用,导致土壤紧实度增加,抑制植株根系生长,同时影响植被恢复能力^[18-19]。滇西北已有的旅游踩踏研究发现随着踩踏强度增加,草甸植物的盖度会明显下降且难以在短期内恢复^[14,20-21],但对于旅游干扰导致的退化梯度上,草甸不同功能群植物地上形态的变化特征、植物生存状态与植物生物量之间的关联等问题尚没有报道。为探究以上两个问题,本研究依据旅游干扰强度确定退化梯度,在退化梯度上分禾本科、莎草科和杂类草 3 个功能群调查草甸植物地上形态特征和地上生物量,并提出两个研究假设:1)退化梯度上不同功能群植物的地上形态特征变化趋势不同;2)草甸植物生存状态与植物地上生物量之间的关联会随退化程度增加而减弱。本研究可为滇西北地区旅游干扰所致的草甸退化治理提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

丛古草原位于云南省香格里拉市石卡雪山山麓,地形平坦,平均海拔 3310 m,属典型的寒温带山地季风气候,夏秋多雨,冬季干旱^[14,22]。据国家气象信息中心 2000—2016 年的资料,该区域年均降水量 619.5 mm,

年均温 6.9℃,全年 70%以上降水量集中在 6—9 月。丛古草原高寒草甸的优势功能群植物为杂类草,土壤类型为高寒草甸土^[23]。杂类草在生长季盛开各色野花,因此丛古草原的草甸也被称为“五花草甸”,具有很高的观赏价值。旅游活动是造成滇西北高寒草甸退化的重要原因,由于旅游践踏、旅游车辆碾压,丛古草原上形成了纵横交错、不同级别的游径。

1.2 实验设计

野外调查 本研究根据游径宽度和游径上的植被覆盖度,设置 3 个退化梯度:一级退化(记作 R1)、二级退化(记作 R2)和对照(记作 CK)(表 1)。于 2018 年 7 月下旬进行草甸植物地上形态特征调查:每个退化梯度随机选择 3 条独立游径(研究区内一级游径共 5 条,二级游径共 7 条,游径间距离均在 50 m 以上),在每条游径上,距路边 10 cm 设置 1 个 1 m×10 m 的调查样地,从中随机抽取 3 个 1 m×1 m 的样方(共 27 个)进行样品采集(图 1)。在每个样方内,按禾本科、莎草科、杂类草 3 个功能群采集每个功能群的 1—3 种优势植物(表 2),每种植物采集 3—5 株地上部分放入信封(避免挤压)、带回室内测定植物地上形态指标。野外共采集 627 株植物样本。

表 1 退化梯度概况

Table 1 General information about the degradation gradient

梯度 Degradation gradient	道路宽度/m The width of road	道路植被盖度/% Plant coverage on the road	距道路 10cm 处植被盖度/% Plant coverage of the roadside	土壤容重/(g/cm ³) Bulk density	土壤含水率/% Water moisture of surface soil
R1	2.5—3	5—50	40—78	0.80—1.16	18.20—35.97
R2	1.85	65—85	68—85	0.55—0.90	35.76—64.21
CK	无道路干扰	100	85—95	0.56—0.89	52.09—67.06

R1: 一级退化 The first level of degradation; R2: 二级退化 The second level of degradation; CK: 对照样地 The control plots

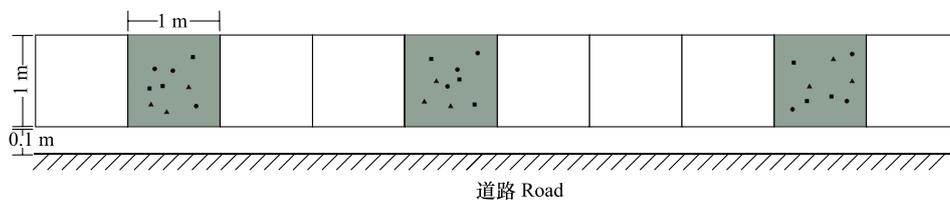


图 1 样地示意图(样方中黑色点代表随机采集的优势植物)

Fig.1 Illustration of a sampling site (black dots mean individuals of dominant plant species)

室内分析 采集的植物样品当天带回到室内,用坐标纸测定植物的株高、植株展度、叶片宽度和长度;在实验室内将采回的植株用纯水洗净后于 80℃ 的烘箱里烘 48 h 至恒重、用电子天平(0.001 g)称重并记录。

表 2 调查样地中采集的主要优势植物

Table 2 Dominant species of plant communities in sampling sites

功能群 Functional group	优势种 Dominant species
禾本科 Gramineae	短颖披碱草 <i>Elymus burchan-buddae</i> 黑穗画眉草 <i>Eragrostis nigra</i>
莎草科 Cyperaceae	无脉薹草 <i>Carex enervis</i> 粗壮嵩草 <i>Kobresia robusta</i> 高山嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>
杂类草 Forbs	马蹄黄 <i>Spenceria ramalana</i> 绢毛匍匐委陵菜 <i>Potentilla reptans</i> var. <i>sericophylla</i> 矮紫苞鸢尾 <i>Iris ruthenica</i> var. <i>nana</i>

1.3 数据处理

用叶片长度和宽度计算叶片长宽比。采用 Zhang 等提出的植被生存状态指数 (Vegetation living state, VLS) 构建方法^[24],用植株高度、植株开展度、叶片长度和叶片宽度 4 个指标构建退化梯度上每个功能群的 VLS 以综合评估不同退化梯度上植物功能群的生长情况。VLS 构建方法如下:(1)采用 Z-Score 标准化方法进行指标标准化, $D_{ij} - D_i / SD_i$,式中 D_{ij} 为指标 i 的第 j 个观测值, D_i 为指标 i 的平均值, SD_i 为指标 i 的标准差,标准化后数值大于 0 说明高于平均水平,小于 0 说明低于平均水平;(2)用标准化指标构建雷达图;(3)计算雷达图面积,记作 VLS 的数值。由于构建 VLS 的 4 个指标极性相同,所以植株的 VLS 的值越大,表明植物生长得越好。

采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 检测退化程度、功能群类型以及它们的交互作用对草甸植物地上形态特征的影响。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对比不同退化梯度上各功能群之间植物地上形态特征的差异性。在方差分析过程中,对方差不齐的指标进行转换,其中,对植物单株生物量和叶片宽度进行对数转换 (\log_{10}),对植株高度、植株开展度、叶片长度和叶片长宽比进行余弦转换。采用线性回归分析探讨 VLS 和植物地上生物量之间的关系。统计分析均在 IBM SPSS Statistics 24.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 退化程度和功能群类型对草甸植物地上形态及生物量的影响

整体来看,在退化梯度上,草甸植物的植株高度、开展度、叶片宽度和叶片长宽比没有显著差异 ($P > 0.05$),植物叶片长度和单株植物地上生物量发生了显著变化 ($P < 0.05$) (表 3)。在不同功能群之间,除了植株展度和叶片长宽比外,其他植物地上形态指标均有显著变化 (表 3)。植物叶片长度、宽度、叶片长宽比和单株植物地上生物量受退化程度和功能群类型的交互影响 (表 3)。

表 3 退化程度和功能群类型对植物地上形态特征的影响

Table 3 Effects of degradation and functional groups on aboveground morphological traits

植物地上形态指标 Aboveground traits of plants	退化梯度 Degradation gradients		功能群 Functional groups		退化梯度×功能群 Degradation gradients× Functional groups	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	株高 Plant height	0.042	0.959	9.400	0.001	2.259
植株开展度 Plant lateral spread	1.677	0.200	2.933	0.065	1.161	0.343
叶片长度 Leaf length	3.296	0.048	5.969	0.006	5.348	0.002
叶片宽度 Leaf width	1.302	0.284	593.516	0.001	6.305	0.001
叶片长宽比 Blade Aspect Ratio	1.034	0.365	2.463	0.099	3.068	0.028
单株植物地上生物量 Aboveground biomass of individual	28.541	0.001	85.514	0.001	3.254	0.022

2.2 退化梯度上禾本科植物地上形态及生物量变化特征

退化梯度上禾本科植株的平均高度和单株植物生物量存在明显差异 ($P < 0.05$),其中对照样地 (CK) 的平均高度和生物量明显高于 R1、R2 样地,R1 样地的平均高度和生物量明显低于 R2 样地 (图 2)。退化梯度上 CK 样地的禾本科植物开展度、叶片长度和叶片长宽比显著高于 R1 和 R2 样地 ($P < 0.05$),R1 和 R2 样地中的这些指标没有显著差异 (图 2)。退化梯度上禾本科植物的叶片宽度没有显著差异 (图 2)。禾本科植物植株高度和地上生物量随退化强度的增加而减小;退化强度对禾本科植物开展度、叶片长度、宽度和叶片长宽比影响不大。

2.3 退化梯度上莎草科植物地上形态及生物量变化特征

退化梯度上莎草科植物的平均高度、叶片长度和叶片长宽比存在明显差异 ($P < 0.05$):R1 样地的植株高度、叶片长度和叶片长宽比明显小于 R2 样地和 CK 样地 (图 3)。退化梯度上莎草科植物的开展度和叶片宽

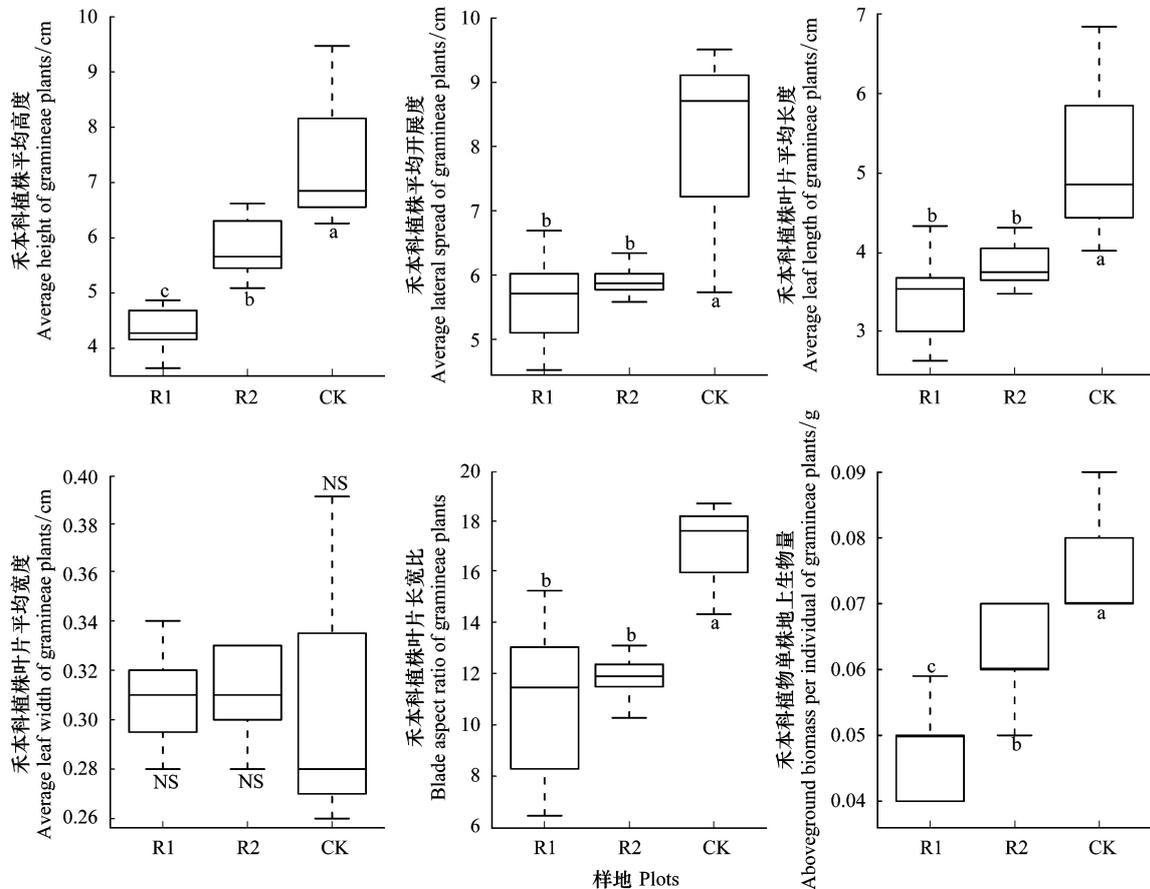


图2 退化梯度上禾本科植物地上形态特征及生物量

Fig.2 Aboveground traits and aboveground biomass of Gramineae plants along a degradation gradient of an alpine meadow in North Yunnan Province

一级退化 (The first level of degradation, R1); 二级退化 (The second level of degradation, R2); 对照样地 (The control plots, CK)

度没有显著差异 (图 3)。CK 样地的莎草科植物单株植物地上生物量显著高于 R1 样地, 但与 R2 样地没有显著差异; R1 样地和 R2 样地的莎草科植物单株植物地上生物量没有显著差异 (图 3)。莎草科植物植株高度、叶片长度、叶片长宽比随退化程度增加而减小; 但退化强度对莎草科植物植株开展度和叶片宽度影响不大。

2.4 退化梯度上杂类草植物地上形态及生物量变化特征

CK 样地的杂类草植株高度、开展度、叶片长度、叶片长宽比和单株植物地上生物量明显大于 R1 样地和 R2 样地; R1 样地中杂类草植物的叶片宽度明显小于 R2 样地和 CK 样地 (图 4)。杂类草植物植株高度、开展度、叶片长度、叶片长宽比和地上生物量随退化强度的增加而减小, 这说明草甸退化对杂类草植物地上形态造成了很明显的负面影响。

2.5 退化梯度上植物生存状态及其与植物地上生物量的关系

综合植株高度、开展度、叶片宽度和叶片长度构建草甸植物的生存状态指数 (VLS)。整体来看, 退化梯度上草甸植物 VLS 的排序为: CK>R2>R1, 但 R2、R1 样地的 VLS 无明显差异, 其中样地的 VLS 最小, 表明草甸退化越严重, 植物生长状况越差。从各功能群看, 禾本科和杂类草植物 VLS 随退化强度的增加而减小; 莎草科植物 VLS 的排序为 CK>R2>R1 (表 4)。

在 CK 样地中, 禾本科植物的 VLS 为 120.84 ± 12.38 , 其显著低于杂类草和莎草科 ($n = 27, P < 0.001$), 说明自然状态下草甸杂类草和莎草科植物的生长状况优于禾本科植物 (图 5)。在退化梯度 R1 和 R2 上, 莎草科

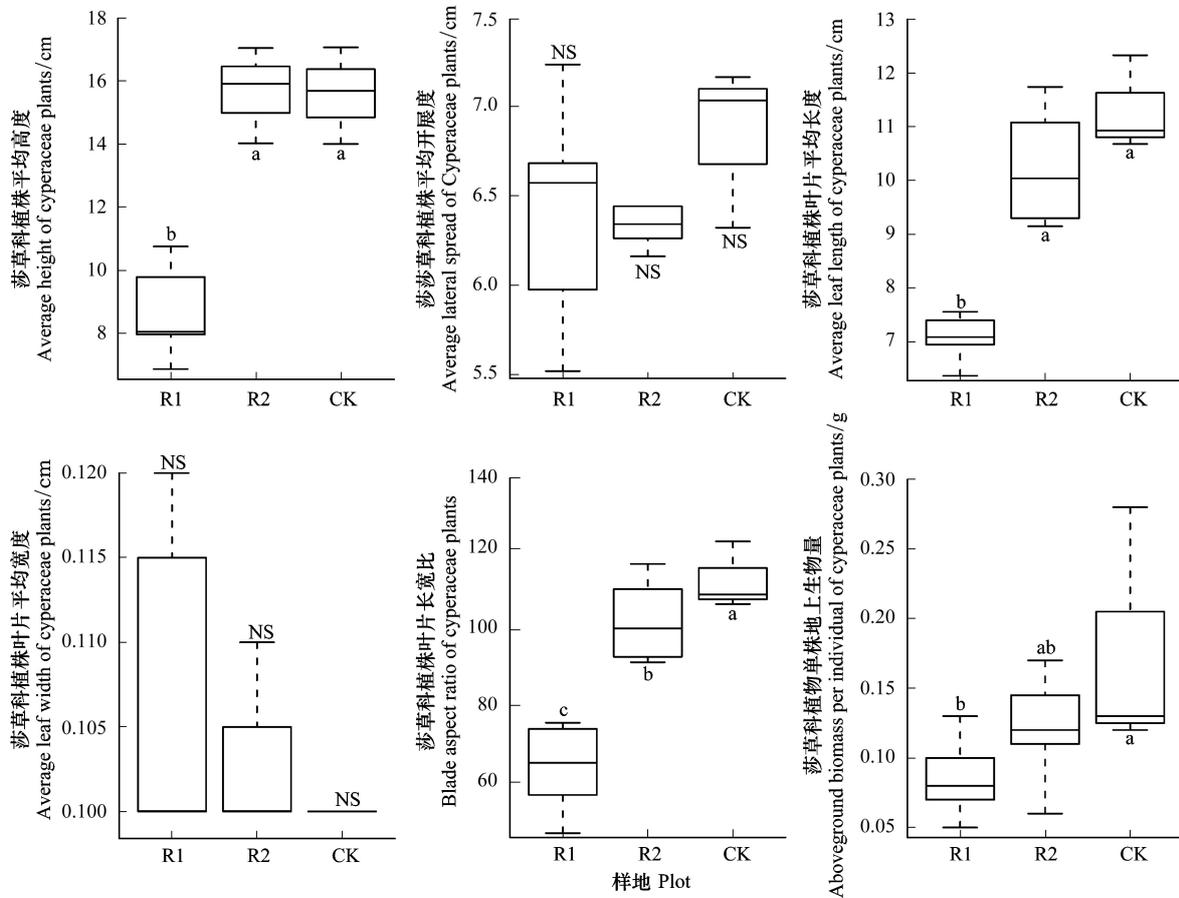


图3 退化梯度上莎草科植物地上形态特征及生物量

Fig.3 Aboveground traits and aboveground biomass of Cyperaceae plants along a degradation gradient of an alpine meadow in North Yunnan Province

植物 VLS 均显著高于禾本科和杂类草 ($n = 27, P < 0.001$), 说明莎草科植物生长状况优于禾本科和杂类草植物 (图 5)。

表 4 退化梯度上不同功能群植物生存状态指数的差异 (均值±SE)

Table 4 Differences of VLS of each plant functional group along a degradation gradient of an alpine meadow (Mean ± SE)

退化梯度 Degradation gradients	禾本科 Gramineae	莎草科 Cyperaceae	杂类草 Forbes	整体 Total
R1	76.92±2.49b	130.73±3.23c	77.55±2.18b	95.07±5.16b
R2	88.85±2.35b	173.25±11.23b	88.32±1.51b	118.02±9.41b
CK	120.84±12.38a	197.33±23.53a	220.27±21.05a	179.48±13.69a

VLS: 植被生存状态指数 Vegetation living state

CK 样地中, 草甸植物的 VLS 与植物地上生物量呈显著正相关回归关系, 其中, 禾本科、莎草科和杂类草植物的 VLS 与植物地上生物量均呈显著正相关回归关系 (图 6)。R1 样地中, 3 个功能群植物的 VLS 和植物地上生物量都呈正相关回归关系, 但总体来看, R1 样地植物的 VLS 和植物地上生物量没有明显的回归关系 (图 6)。R2 样地中, 禾本科和杂类草植物的 VLS 和植物地上生物量呈显著正相关回归关系, 莎草科植物的 VLS 和植物地上生物量没有显著的回归关系, 总体来看, R2 样地植物 VLS 和植物地上生物量没有显著的回归关系 (图 6)。

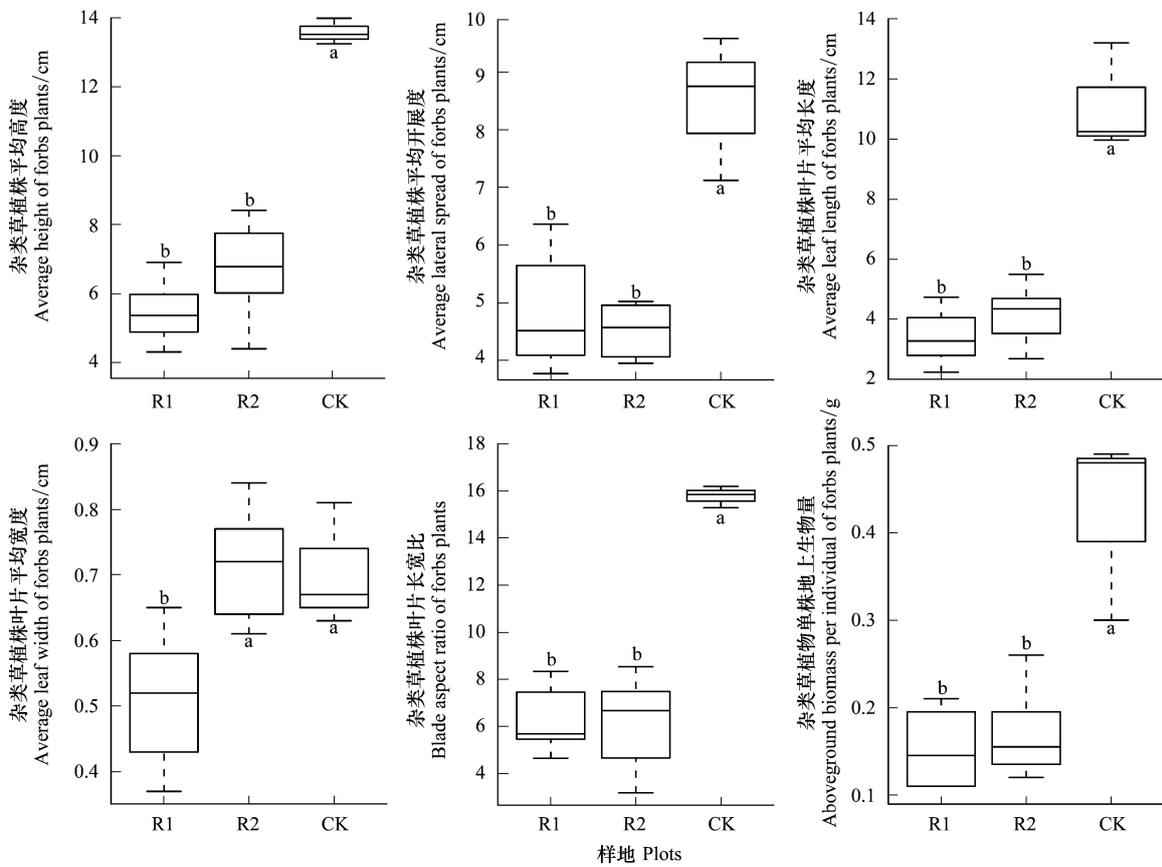


图 4 退化梯度上杂类草植物地上形态特征及生物量

Fig.4 Aboveground traits and aboveground biomass of Forbs along a degradation gradient of an alpine meadow in North Yunnan Province

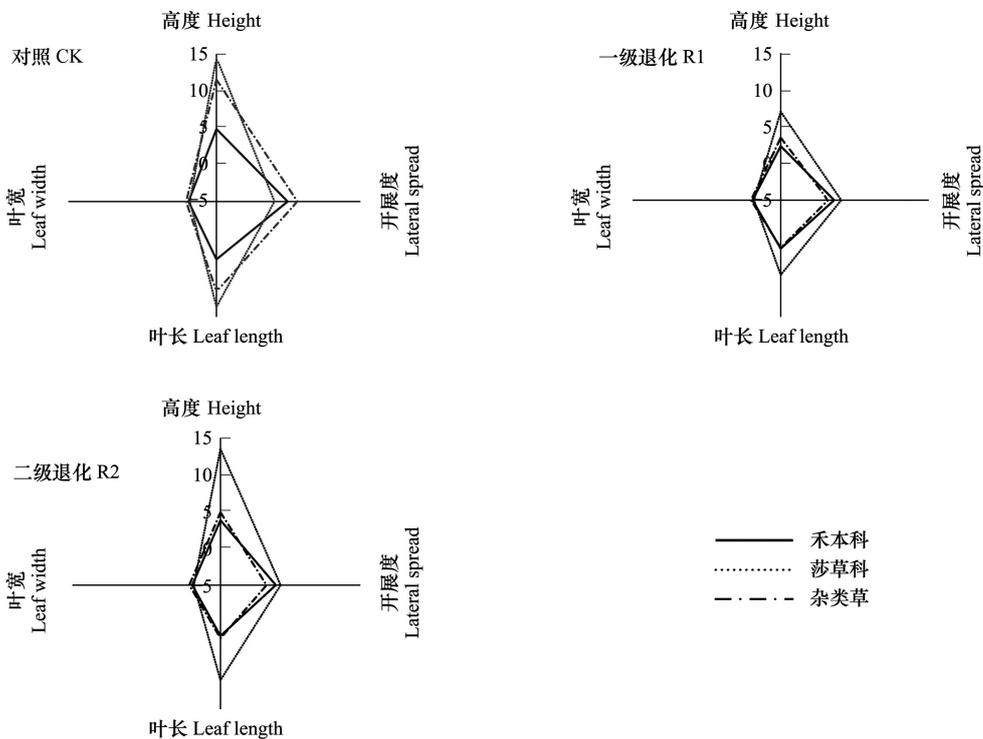


图 5 各梯度上不同功能群植物的生存状态指数

Fig.5 VLS of different functional groups of plants in each level of degradation

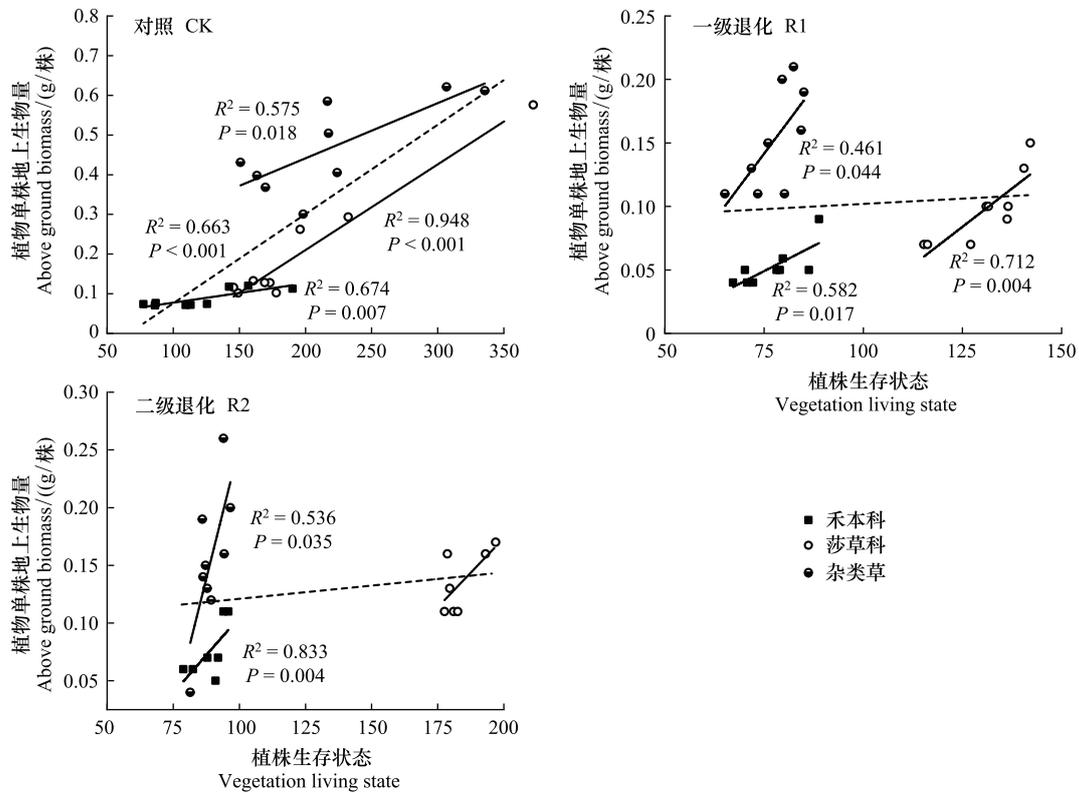


图 6 退化梯度上植物生存状态和单株植物地上生物量的关系

Fig.6 The relationship between VLS and plant aboveground biomass in each level of degradation

3 讨论与结论

植物外部形态特征虽由遗传特性和外界环境共同决定^[25],但环境扰动可显著改变植物的形态特征^[26]。当面临外界干扰时植物形态特征会对植物个体在群落中的竞争能力以及物种的生态位分化产生重要影响,即:植物形态特征的变化(如高度、展度)可改变植物群落的垂直结构和水平结构^[27]。所以,可通过植物形态特征分析环境干扰梯度上植物群落结构变化的成因。本研究发现,在 CK 中杂类草植物的 VLS 显著高于其他两个功能群植物,但在 R1 和 R2 中莎草科植物的 VLS 显著高于其他两个功能群,按此推测,旅游干扰导致的草甸退化过程中,莎草科植物将逐步取代杂类草,在群落中占据优势地位,滇西北杂类草草甸的观赏性将下降。不同功能群植物的耐践踏能力是导致这种现象发生的原因,之前的研究表明,植物地上形态特征对植物的抗践踏能力有较大影响:莲座状、丛生状或矮生型的植物常常具备更强的抗践踏能力^[14,17]。在高寒草甸中,莎草科植物(例如高山嵩草、粗壮苔草)属于丛生状或垫状草本,植株低矮且叶片多成线状、有韧性,抗践踏能力较强且位于草本群落中下层,因此受损程度小于禾本科和杂类草植物;而杂类草的植株高度、开展度和叶面积相对较大,对践踏干扰的抵抗力相对较弱。

本研究发现,随退化程度增加,禾本科、莎草科和杂类草植物的地上生物量均显著降低。该现象与青藏高原腹地的研究结果一致^[28-31],说明各种成因(如过度放牧、气候变化、旅游踩踏等)导致的草甸退化均会降低草甸植物群落的生产能力。

植株高度、植株开展度、叶片长度和叶片宽度是影响草甸植物群落生产力的重要因素,因此这些功能性状在决定植物生存状态的同时也影响植物群落的生产力。本研究中,从 VLS 雷达图上可直观看随退化程度加剧,叶片长度是影响莎草科生存状态指数的最大指标,其次是植株高度,而植株开展度和叶宽对莎草科植物

VLS 没有太大影响。杂类草及禾本科植物在不同梯度上的植株高度、叶片长度和开展度对植物 VLS 值影响较大。这说明虽然退化梯度上不同功能群植物的地上形态特征变化趋势相同,但影响植物生存状态和生物量的形态指标不尽相同。

通常情况下,植物地上形态特征和生物量之间存在显著的正相关关系^[32-34]。本研究中,随退化强度增加,禾本科、莎草科和杂类草植物的生存状态指数(VLS)和植物地上生物量均显著降低。但对 VLS 和植物生物量的回归分析发现,CK 中草甸植物的 VLS 和植物地上生物量呈正相关,且存在显著的回归关系;而 R2 和 R1 中,尽管各功能群植物的 VLS 和植物地上生物量之间存在显著的回归关系,但在植物群落层次上植物 VLS 和植物地上生物量之间没有显著的回归关系。退化梯度上莎草科植物 VLS 降幅小于禾本科和杂类草植物是导致退化后草甸植物 VLS 和生物量回归关系减弱的直接原因。这个结果表明,用健康草甸的植物地上生物量回归模型预测滇西北旅游干扰强烈区域草甸的植物生物量可能会产生较大的偏颇,或者说旅游干扰导致不同功能群植物地上形态特征的差异性变化可能会增加退化草甸植物生物量预测的不确定性。

综上,本研究的两个假设均得到验证,即退化梯度上不同功能群植物的地上形态特征变化趋势不同;随退化程度加深,草甸植物生存状态与植物地上生物量之间的回归关系逐渐减弱。

参考文献(References):

- [1] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 张新时. 西藏植被的高原地带性. 植物学报, 1978, 20(2): 140-149.
- [3] 王文颖, 王启基. 高寒嵩草草甸退化生态系统植物群落结构特征及物种多样性分析. 草业学报, 2001, 10(3): 8-14.
- [4] 中国草地生态保障与粮食安全战略研究”项目组. 中国草地生态保障与粮食安全战略研究. 北京: 科学出版社, 2017.
- [5] Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan plateau: a review of the evidence of its magnitude and causes. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 1-12.
- [6] Gao Q Z, Ganjurjav, Li Y, Wan Y F, Zhang W N, Borjigdal A. Challenges in disentangling the influence of climatic and socio-economic factors on alpine grassland ecosystems in the source area of Asian major rivers. *Quaternary International*, 2013, 304(9): 126-132.
- [7] 崔庆虎, 蒋志刚, 刘季科, 苏建平. 青藏高原草地退化原因述评. 草业科学, 2007, 24(5): 20-26.
- [8] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高清竹, 张德铨, 欧阳华. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [9] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26(1): 1-21.
- [10] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [11] 张燕妮. 滇西北优先保护植物群落类型的初步研究[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
- [12] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [13] Lehnert L W, Wesche K, Trachte K, Reudenbach C, Bendix J. Climate variability rather than overstocking causes recent large scale cover changes of Tibetan pastures. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24367.
- [14] 黄晓霞, 张勇, 和克俭, 丁佼, 赵文娟. 高寒草甸对旅游踩踏的抗干扰响应能力. 草业学报, 2014, 23(2): 333-339.
- [15] 臧岳铭, 朱志红, 李英年, 王文娟, 席博. 高寒矮嵩草草甸物种多样性与功能多样性对初级生产力的影响. 生态学杂志, 2009, 28(6): 999-1005.
- [16] 任健, 墨继光, 张树斌. 草地共管在滇西北退化草地治理中的实践. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2010, 4(4): 19-23.
- [17] Liddle M J. A selective review of the ecological effects of human trampling on natural ecosystems. *Biological Conservation*, 1975, 7(1): 17-36.
- [18] 周华坤, 赵新全, 温军, 陈哲, 姚步青, 杨元武, 徐维新, 段吉闯. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征. 草业学报, 2012, 21(5): 1-11.
- [19] 张昆, 田昆, 吕宪国, 罗姗, 李吉玉, 李宁云. 旅游干扰对纳帕海湖滨草甸湿地土壤水文调蓄功能的影响. 水科学进展, 2009, 20(6): 800-805.
- [20] 张勇. 旅游踩踏对香格里拉高寒草甸植物群落的短期影响[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
- [21] 何淑婧, 李伟, 程希平, 谭芮, 松卫红. 践踏干扰对碧塔海高寒草甸植被茎叶性状、物种多样性和功能多样性的影响. 生态学报, 2019, 39(6): 2063-2070.

- [22] 刘振亚, 张晓宁, 李丽萍, 王行, 张赞, 孙梅, 肖德荣. 大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物的光和 CO₂ 利用能力的影响. 生态学报, 2017, 37(23): 7821-7832.
- [23] 王君, 沙丽清, 李检舟, 冯志立. 云南香格里拉地区亚高山草甸不同放牧管理方式下的碳排放. 生态学报, 2008, 28(8): 3574-3583.
- [24] Zhang Y, Gao Q Z, Dong S K, Liu S L, Wang X X, Su X K, Li Y Y, Tang L, Wu X Y, Zhao H D. Effects of grazing and climate warming on plant diversity, productivity and living state in the alpine rangelands and cultivated grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 57-65.
- [25] 王海清, 徐柱, 祁娟. 披碱草属四种植物主要形态特征的变异性比较. 中国草地学报, 2009, 31(3): 30-35.
- [26] Schellberg J, da S Pontes L. Plant functional traits and nutrient gradients on grassland. *Grass and Forage Science*, 2012, 67(3): 305-319.
- [27] 牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳, 李庆芬. 基础生态学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [28] 陈乐乐, 施建军, 王彦龙, 马玉寿, 董全民, 侯宪宽. 高寒地区不同退化程度草地群落结构特征研究. 草地学报, 2016, 24(1): 210-213.
- [29] Tang L, Dong S K, Sherman R, Liu S L, Liu Q R, Wang X X, Su X K, Zhang Y, Li Y Y, Wu Y, Zhao H D, Zhao C, Wu X Y. Changes in vegetation composition and plant diversity with rangeland degradation in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 107-115.
- [30] 张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. 生物多样性, 2018, 26(2): 111-129.
- [31] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 施建军, 王彦龙, 李世雄, 杨时海, 盛丽. 牦牛放牧强度对小嵩草草甸两季轮牧草场植物群落数量特征的影响. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2233-2239.
- [32] 罗文蓉, 栗文瀚, 干珠扎布, 闫玉龙, 李钰, 曹旭娟, 何世丞, 旦久罗布, 高清竹, 胡国铮. 施氮对藏北垂穗披碱草人工草地叶片功能性状和种群特征的影响. 草业学报, 2018, 27(5): 51-60.
- [33] 周天阳, 高景, 贺俊东, 薛晶月, 孙建, 王金牛, 徐波, 谢雨, 吴彦. 高山草地环山样带异质坡向上 3 种植物的株高、叶片性状与生物量分配. 应用与环境生物学报, 2018, 24(3): 425-433.
- [34] 高景, 王金牛, 徐波, 谢雨, 贺俊东, 吴彦. 不同雪被厚度下典型高山草地早春植物叶片性状、株高及生物量分配的研究. 植物生态学报, 2016, 40(8): 775-787.