

# 坡向对东祁连山高寒草甸群落物种 功能群及其多样性的影响

张 倩<sup>1,2</sup>, 孙小妹<sup>2,3</sup>, 杨 晶<sup>1,2</sup>, 康宇坤<sup>1,2</sup>, 姚宝辉<sup>1,2</sup>, 苏军虎<sup>1,2\*</sup>

(1 甘肃农业大学 草业学院/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, 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, 兰州 730070; 3 甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070)

**摘 要:**为探究祁连山东缘地区不同坡向的高寒草甸群落物种功能群和多样性差异,该研究选择北坡(N坡)、西北坡(NW坡)、西坡(W坡)、东坡(E坡)、东北坡(NE坡)、西南坡(SW坡)和南坡(S坡)7个坡向类型,调查各坡向的植被特征(高度、盖度和频度),测定土壤因子,分析物种均匀度和多样性指数及其相关性等。结果发现:(1)研究区样地共有植物11科18属21种,主要有豆科(4属4种)、菊科(3属3种)、蔷薇科(1属3种)、莎草科(2属2种)、禾本科(2属2种)和蓼科(1属2种);不同坡向的植物科、属数量变化趋势与种相同,均为东北坡、西南坡、北坡(76.19%)>南坡(66.67%)>东坡(61.90%)>西坡、西北坡(19.05%)。(2)不同坡向的草地群落组成不同,其中东坡、南坡和东北坡主要以草本植物为主,西南坡和北坡为草本和灌丛交错区,西坡和西北坡主要以灌丛为主。(3)不同坡向的物种功能群不同,其中东坡、南坡、东北坡、北坡和西南坡的莎草类重要值最高,西坡和西北坡只有豆科和杂类草,且杂类草重要值最高。(4)不同坡向的优势功能群不同,其中:禾本科植物的重要值大小为阴坡(NE坡)>阳坡(S坡和SW坡)>半阳坡(E坡),莎草科植物重要值大小为半阳坡(E坡)>阳坡(S坡)>阴坡(NE坡和N坡),豆科植物重要值大小为阳坡(S坡)>阴坡(N坡、NW坡和NE坡)>半阳坡(E坡)>半阴坡(W坡),杂类草植物重要值大小为半阴坡(W坡)>阴坡(N坡和NE坡)>半阳坡(E坡)>阳坡(SW坡和S坡)。(5)随着坡向梯度变化,物种丰富度和香农-威纳多样性指数变化一致,其大小均表现为:阴坡>阳坡>半阳坡>半阴坡。(6)冗余分析发现,土壤含水量和碳氮比是影响灌丛植物[瑞香(*Daphne odora*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)和头花杜鹃(*Rhododendron capitatum*)]重要值的重要因素。研究表明,不同坡向的土壤水分、养分和光照等的变化显著影响了高寒草甸植物群落物种功能群及其多样性。

**关键词:**高寒草甸;坡向;物种功能群;生活型;物种多样性

中图分类号:Q948.114

文献标志码:A

## Effect of Slope Aspect on Species Functional Groups and Species Diversity in Alpine Meadow of the East of Qilian Mountains

ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, SUN Xiaomei<sup>2,3</sup>, YANG Jing<sup>1,2</sup>, KANG Yukun<sup>1,2</sup>, YAO Baohui<sup>1,2</sup>, SU Junhu<sup>1,2\*</sup>

(1 College of Grassland Science, 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; 3 College of Resource and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

收稿日期:2019-04-29;修改稿收到日期:2019-07-04

基金项目:陇原青年创新创业人才(团队)项目;国家自然科学基金项目(31460566, 31760706);甘肃农业大学“伏羲杰出人才”培育项目(Gaufx-02J03);甘肃农业大学学科建设专项基金(GSAU-XKJS-2018-016)

作者简介:张 倩(1995—),女,在读硕士研究生,研究方向为草地生态。E-mail: 1634532748@qq.com

\* 通信作者:苏军虎,副教授,硕士生导师,主要从事草地生态与草地保护研究。E-mail: sujh@gsau.edu.cn

**Abstract:** To explore the differences of species functional groups and diversity of alpine meadow communities on different slopes in the eastern margin of Qilian, we investigated the characteristics of vegetation (height, coverage and frequency) on seven slopes (north slope, northwest slope, west slope, east slope, northeast slope, southwest slope, and south slope), determined soil factors, species evenness and diversity index and their correlation. The results showed that: (1) There were 21 families, 18 genera and 21 species in the study area, mainly Leguminosae (4 genera and 4 species), Compositae (3 genera and 3 species), Rosaceae (1 genus and 3 species), Cyperaceae (2 genera and 2 species), Gramineae (2 genera and 2 species) and Polygonaceae (1 genus and 2 species). The trend of plant families and genera are similar to species in different slopes, all of which are northeast, southwest and north slopes (76.19%) > south slope (66.67%) > east slope (61.90%) > west slope, northwest slope (19.05%). (2) The composition of grassland communities is different in different slopes, among which the east, south and northeast slopes are mainly herbaceous plants, the southwest and north slopes are herbaceous and shrub interlaced plant, and the west and northwest slopes are mainly shrubs plant. (3) The functional groups are different in different slopes. The important values of sedges on the east, south, north, south and southwest slopes are the highest, while the west and north slopes are only legumes and forbs, which has the highest value. (4) There are different dominant functional groups in different slopes. Important values of gramineous plants were as follows: shady slope (northeast slope) > sunny slope (south slope and southwest slope) > semi-sunny slope (east slope); for leguminous plants: sunny slope (south slope) > shady slope (north slope, northwest slope and northeast slope) > semi-sunny slope (east slope) > semi-shady slope (west slope); for forbs: semi-shady slope (west slope) > shady slope (north and northeast slope) > semi-sunny slope (east slope) > sunny slope (southwest slope and south slope). (5) With the change of slope gradient, the change of species richness and the Shannon-Wiener diversity index are consistent, which are represented as: shady slope > sunny slope > semi-sun slope > semi-shady slope. (6) Redundancy analysis showed that soil water content and C : N are important factors affecting the important values of shrub plants (*Daphne odora*, *Potentilla fruticosa* and *Rhododendron capitatum*). These results suggest that changes in soil moisture, nutrients and light of different slope orientation have significantly affected the species functional groups and their diversity in alpine meadow vegetation communities.

**Key words:** alpine meadow; slope; species functional group; lifestyle; species diversity

生物多样性对生态系统生产、功能和服务等有决定性作用,有关生物多样性的形成与维持也是当今生态研究的热点问题之一<sup>[1]</sup>。在陆地生态系统中,微环境对植物生长、繁殖和死亡起决定性作用,微环境一方面直接或间接影响了物种的光合作用、蒸发蒸腾和养分循环周期等基本过程,另一方面微环境的形成也是多种生物和非生物因素相互作用的结果<sup>[2]</sup>。研究发现,微环境变化会改变植物群落结构和功能,继而影响生态系统过程等<sup>[3]</sup>。

地形是微环境的主要因素之一,会导致土壤空间发生很大变化,并影响草地群落物种的分布、功能以及自身的适应性。山地环境下生长的植物,一方面受到海拔等大尺度因素的影响,另一方面受到坡向、坡度等小尺度因素的影响<sup>[4]</sup>。坡向改变地表接受的光照、风向风速、土壤湿度、土壤温度和土壤碳、氮等营养循环<sup>[5]</sup>。而这些因素直接影响不同坡向下

植被的生长情况,从而导致草地群落物种多样性、优势种等产生差异<sup>[6]</sup>。研究发现青藏高原高寒草甸阳坡物种的 $\alpha$ 多样性低于阴坡物种<sup>[7]</sup>,且阳坡物种多样性和生产力都较阴坡低<sup>[8]</sup>。赵景学等<sup>[9]</sup>发现高寒草地物种香农-威纳多样性指数和物种丰富度与土壤有机质、全氮、全磷等呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。保娅等<sup>[10]</sup>发现高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸物种香农-威纳多样性指数与土壤全氮和pH值呈显著相关( $P < 0.05$ )。从阳坡到阴坡梯度上,物种多样性和生产力都有增高的趋势,且土壤含水量是限制植被分布的重要因素<sup>[6]</sup>。刘旻霞等<sup>[11]</sup>发现,土壤含水量和pH值是影响土壤养分和植物功能性状(叶片氮、磷、比叶面积和物种高度)的重要因素。但王玉等<sup>[12]</sup>发现坡向对山地草原植被物种均匀度、丰富度和香农-威纳多样性指数影响均不显著。不同的区域可能受到气候因素等影响不

同,导致各坡向下影响物种功能群和多样性差异的原因并不一致,探明不同区域植被群落多样性分布与形成的原因等,对优化草地管理策略具有重要意义。

祁连山位于青藏高寒区、西北半干旱区和东部湿润区交界带,是西北地区重要的水源涵养区,由于境内海拔梯度高、水系分布广泛、植被水源涵养功能强等成为气候变化敏感区和生态系统脆弱区<sup>[13]</sup>,高寒草甸是该地区的重要植被类型之一,主要以多年生草本植物为优势种,以莎草科的矮嵩草(*K. humilis*)和苔草(*Carex supina*)等为建群种形成的草甸类型<sup>[14]</sup>。近年来,受人类活动干扰、气候变化和鼠虫害等综合影响,祁连山区高寒草甸退化更加严重,草地植被盖度、结构和生物量等都呈下降趋势<sup>[15]</sup>。祁连山生态环境问题受到各界高度重视,其生态保护和系统修复与功能提升迫在眉睫,本研究以祁连山东缘天祝藏族自治县高寒草甸退化草地为对象,分析阴坡(西北坡、北坡、东北坡)、阳坡(西南坡、南坡)、半阴坡(西坡)和半阳坡(东坡)物种群落组成、物种功能群、生活型和物种多样性分布情况,探讨群落物种分布和微环境间的关系,旨在为祁连山区高寒草甸退化草地修复、水土保持和生态功能提升优化等提供参考和科学依据。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省天祝县抓喜秀龙镇南泥沟附近的高寒草甸退化草地。地理位置 37°19'N,102°45'E,平均海拔约 3 010 m。该地区气温年较差小,日较差大,四季不甚分明,气温垂直分布明显,年均气温 1℃,年均日照时数 2 500~2 700 h,降水主要集中在 6~8 月,年均降雨量 400 mm,年均蒸发量 1 600 mm,属大陆性半干旱气候,无绝对无霜期,亚高山土壤类型<sup>[16]</sup>。

### 1.2 样地选择与试验设计

于 2018 年 9 月,在南泥沟附近选择坡向分异明显的典型山坡,通过 GPS 测定坡向,沿顺时针方向将整座山坡沿着山体中部,依次划分为南坡 S(包括南偏东 22.5°和南偏西 22.5°)、西南坡 SW(包括西偏南 22.5°和西偏南 67.5°)、西坡 W(包括西偏南 22.5°和西偏北 22.5°)、西北坡 NW(包括西偏北 22.5°和西偏北 67.5°)、北坡 N(包括北偏东 22.5°和北偏西 22.5°)、东北坡 NE(包括东偏北 22.5°和东偏北 67.5°)和东坡 E(包括东偏北 22.5°和东偏南 22.5°),7 块试验样地(图 1)。依据不同坡向下的植

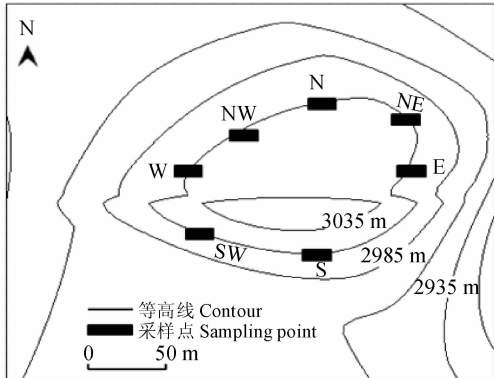
被分布,分为草本区、灌丛区和草本-灌丛区。

### 1.3 植物群落取样及计算方法

**1.3.1 群落特征测量** 分别在 E 坡、S 坡、NE 坡、SW 坡和 N 坡各坡向下每隔 10 m 设置一个样点,每个坡向设置 3 个样点,每个样点设置 1 个 50 cm×50 cm 的样方。针刺 100 次得到每一物种的盖度,且在每个坡向下扔 10 次样圆(0.25 m<sup>2</sup>),记录每一物种出现的频度;在 SW 坡、N 坡、W 坡和 NW 坡各坡向下用 50 m 的样绳测量 3 次,得到每种灌木盖度(用每个物种在样绳上投影面积的总和占总样绳长度的比例来表示每个物种的盖度),在每个坡向下用 50 m 的样绳测量 10 次,得到每种灌木的频度;测量各物种的高度(随机测量 10 次)<sup>[17]</sup>。根据 Raunkiaer 生活型分类系统将植被分为高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物和地下芽植物<sup>[18]</sup>。根据植物的功能性将植物分为禾本科、莎草科、豆科和杂类草<sup>[19]</sup>。

**1.3.2 土壤理化性质和微生物数量测定方法** 土壤 pH 值采用酸度计法,土壤含水量采用烘干法,土壤全氮采用凯氏定氮法,全磷采用钼锑抗显色法,有机碳采用硫酸-重铬酸钾外加热法<sup>[20]</sup>。

微生物数量测定的培养基分别使用:细菌-牛肉膏蛋白胨培养基,真菌-马丁氏-孟加拉红培养基,放线菌-改良高氏一号培养基,将接种的培养基放入 28℃ 的培养箱(细菌培养 3~4 d、真菌培养 2~3 d、放线菌培养 5~7 d);3 种土壤微生物数量均采用稀释倾注平板涂布法,称取 10 g 土壤样品,在无菌环境下用灭菌后的生理盐水配制不同梯度的土壤悬浊



N. 北坡;NW. 西北坡;W. 西坡;SW. 西南坡;S. 南坡;E. 东坡;  
NE. 东北坡;下同。

图 1 研究区域样地图

N. North slope; NW. Northwest slope; W. West slope;  
SW. Southwest slope; S. South slope; E. East slope;  
NE. Northeast slope; the same as below

Fig. 1 Sample plot of study area

液(经过预实验选择稀释梯度分别为:细菌  $10^{-4}$ 、真菌  $10^{-2}$ 、放线菌  $10^{-3}$ );镜检计数(土壤微生物数量(cfu/g)=菌落平均数 $\times$ 稀释倍数/土壤质量)<sup>[21]</sup>。

1.3.3 物种重要值、丰富度、均匀度和香农-威纳多样性指数计算方法

物种重要值:  $(IV) = A + B + C$

物种丰富度:  $(O) = \frac{S-1}{\ln N}$

物种均匀度:  $(J_{sw}) = \frac{H}{\ln S}$

物种香农-威纳多样性指数:  $(H) = - \sum P_i \ln(P_i)$

$IV$  表示物种重要值,  $A$  表示物种相对高度,  $B$  表示物种相对盖度,  $C$  表示物种相对频度;  $O$  表示物种丰富度,  $S$  表示样方中物种总数,  $N$  表示样方中各物种重要值之和;  $P_i$  表示物种  $i$  的相对重要值,  $J_{sw}$  表示物种均匀度;  $H$  表示物种香农-威纳多样性指数<sup>[22]</sup>。

1.4 数据处理

用 Excel 2007 对所有数据进行统计整理,用 SPSS19.0 对不同坡向下物种丰富度、均匀度和香农-威纳多样性指数进行单因素方差分析,用 R 语言软件 Vegan 包进行冗余分析(RDA),判断土壤因子、土壤微生物数量对物种重要值的影响程度。 $Pr$  表示显著性检验的结果,所有显著性均采用蒙特卡

罗置换检验(置换次数 999 次)<sup>[23]</sup>。

2 结果与分析

2.1 不同坡向下群落科、属和种组成

研究样地共有 11 科 18 属 21 种,其中豆科(4 属 4 种)、菊科(3 属 3 种)、蔷薇科(1 属 3 种)、莎草科(2 属 2 种)、禾本科(2 属 2 种)和蓼科(1 属 2 种)物种分布较多(表 1)。

不同坡向下草地的物种数目为:东北坡、西南坡和北坡均为 16 种,南坡为 14 种,东坡为 13 种,西坡和西北坡均为 4 种,属和科的数量变化趋势和物种的相同,均为东北坡、西南坡和北坡 $>$ 南坡 $>$ 东坡 $>$ 西坡和西北坡。东坡、南坡、东北坡、西坡、西北坡、西南坡和北坡物种数分别占本群落的 61.90%、66.67%、76.19%、19.05%、19.05%、76.19% 和 76.19%(表 1)。

2.2 不同坡向下群落优势种、亚优势种和伴生种比较

从不同坡向草地群落组成来看,东坡、南坡和东北坡 3 个坡向主要以草本植物为主,西南坡和北坡为草本和灌丛交错区,西坡和西北坡主要以灌丛为主。各坡向群落优势种+亚优势种+伴生种在东坡为苔草+臭蒿(*Artemisia hedinii*) + 天胡荽(*Hydrocotyle sibthorpioides*),南坡为苔草+矮蒿

表 1 不同坡向下草地群落科、属和种的比较  
Table 1 Comparison of families, genera and species of grassland in different slopes

	东坡 East slope	南坡 South slope	东北坡 Northeast slope	西坡 West slope	西北坡 Northwest slope	西南坡 Southwest slope	北坡 North slope
豆科 Leguminosae	2	2	3	1	1	2	3
菊科 Asteraceae	3	3	3	0	0	3	3
蔷薇科 Rosaceae	2	2	2	1	1	3	2
莎草科 Cyperaceae	2	2	2	0	0	2	2
禾本科 Gramineae	1	1	2	0	0	1	1
蓼科 Polygonaceae	1	2	1	0	0	1	1
玄参科 Scrophulariaceae	1	1	1	0	0	1	1
伞形科 Umbelliferae	1	1	1	0	0	1	1
杜鹃花科 Ericaceae	0	0	1	1	1	1	1
瑞香科 Thymelaeaceae	0	0	0	1	1	0	1
牻牛儿苗科 Geraniaceae	0	0	0	0	0	1	0
总科数 Total families	8	8	9	4	4	10	10
总属数 Total genera	12	12	15	4	4	14	15
总种数 Total species	13	14	16	4	4	16	16
总物种数占本群落比例 Total species rate/%	61.90	66.67	76.19	19.05	19.05	76.19	76.19

表 2 不同坡向草地群落优势种、亚优势种和主要伴生种重要值的比较  
Table 2 Comparison of important values on dominant species, sub-dominant species and main associated species in different sloping grassland communities

坡向 Slope aspect	优势种 Dominant species		亚优势种 Sub-dominant species		主要伴生种 Main companion species	
	种名 species	重要值 Important value	种名 species	重要值 Important value	种名 species	重要值 Important value
东坡 East slope	苔草 <i>Carex supina</i>	2.099	臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>	1.196	天胡荽 <i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>	0.422
	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	1.692	乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i>	1.074	兰石草 <i>Lancea tibetica</i>	0.392
	矮嵩草 <i>K. humilis</i>	1.504	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	0.520	黄花苜蓿 <i>Medicago falcata</i>	0.452
南坡 South slope	苔草 <i>C. supina</i>	2.062	矮嵩草 <i>K. humilis</i>	1.216	冰草 <i>A. cristatum</i>	0.686
	珠芽蓼 <i>P. viviparum</i>	1.979	黄花苜蓿 <i>M. falcata</i>	1.103	天胡荽 <i>H. sibthorpioides</i>	0.484
	臭蒿 <i>A. hedinii</i>	1.301	黄花棘豆 <i>O. ochrocephala</i>	0.901	乳白香青 <i>A. lacteal</i>	0.852
东北坡 Northeast slope	矮嵩草 <i>K. humilis</i>	2.332	黄花苜蓿 <i>M. falcata</i>	1.042	黄花棘豆 <i>O. ochrocephala</i>	0.741
	珠芽蓼 <i>P. viviparum</i>	1.655	臭蒿 <i>A. hedinii</i>	1.014	天胡荽 <i>H. sibthorpioides</i>	0.695
	冰草 <i>A. cristatum</i>	1.125	火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	0.838	乳白香青 <i>A. lacteal</i>	0.749
西坡 West slope	头花杜鹃 <i>Rhododendron capitatum</i>	1.399	鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i>	0.180	—	—
	金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	1.282	—	—	—	—
	瑞香 <i>Daphne odora</i>	0.742	—	—	—	—
西北坡 Northwest slope	头花杜鹃 <i>R. capitatum</i>	1.719	鬼箭锦鸡儿 <i>C. jubata</i>	0.704	—	—
	瑞香 <i>D. odora</i>	1.696	—	—	—	—
	金露梅 <i>P. fruticosa</i>	1.675	—	—	—	—
西南坡 Southwest slope	珠芽蓼 <i>P. viviparum</i>	2.002	金露梅 <i>P. fruticosa</i>	1.225	头花杜鹃 <i>R. capitatum</i>	0.656
	苔草 <i>C. supina</i>	1.922	乳白香青 <i>A. lactea</i>	0.878	冰草 <i>A. cristatum</i>	0.565
	臭蒿 <i>A. hedinii</i>	1.289	黄花苜蓿 <i>M. falcata</i>	0.736	鼠掌老鹳草 <i>Geranium sibiricum</i>	0.467
北坡 North slope	矮嵩草 <i>K. humilis</i>	1.958	臭蒿 <i>A. hedinii</i>	1.364	乳白香青 <i>A. lacteal</i>	0.725
	金露梅 <i>P. fruticosa</i>	1.754	珠芽蓼 <i>P. viviparum</i>	1.296	黄花棘豆 <i>O. ochrocephala</i>	0.715
	头花杜鹃 <i>R. capitatum</i>	1.640	鬼箭锦鸡儿 <i>C. jubata</i>	0.916	瑞香 <i>D. odora</i>	0.711

注：— 表示该坡向下无此物种  
Note: — indicates no this species in the slope

表 3 不同坡向下物种多样性的比较

Table 3 Comparison of species diversity in different slopes

坡向 Slope aspect	均匀度 Uniformity	丰富度 Richness	香农-威纳多样性指数 Shannon-Weiner index
东坡 East slope	0.93±0.02a	3.53±0.32a	2.06±0.22a
南坡 South slope	0.95±0.00a	3.90±0.34a	2.23±0.15a
东北坡 Northeast slope	0.95±0.01a	3.65±0.63a	2.14±0.23a
西坡 West slope	0.96±0.02a	1.78±0.16b	1.01±0.17b
西北坡 Northwest slope	0.94±0.02a	1.82±0.22b	1.31±0.03b
西南坡 Southwest slope	0.94±0.02a	3.96±0.62a	2.17±0.20a
北坡 North slope	0.95±0.01a	4.14±0.37a	2.31±0.18a

注:不同字母表示不同坡向下差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different letters indicate significant difference in different slopes ( $P<0.05$ )

草+冰草(*Agropyron cristatum*),东北坡为矮嵩草+臭蒿+天胡荽,西南坡为苔草+金露梅+冰草,北坡为矮嵩草+臭蒿+乳白香青,西坡和西北坡优势种+亚优势种为:头花杜鹃+鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)(表 2)。

2.3 不同坡向下物种多样性比较

多样性分析结果(表 3)表明,不同坡向下物种的均匀度值在 0.93~0.96 之间,均匀度在坡向之间均无显著性差异( $P>0.05$ )。同时,不同坡向下物种丰富度为草本-灌丛区(北坡、西南坡)较高,草本植物区(东坡、南坡和东北坡)次之,灌丛区(西坡、西北坡)较低,具体表现为:北坡>西南坡>南坡>东北坡>东坡>西北坡>西坡,且西坡和西北坡物种丰富度显著低于其他坡向( $P<0.05$ )。另外,不同坡向下物种的香农-威纳多样性指数以灌丛区相对较低,草本-灌丛区和草本区相对较高。其中,物种香农-威纳多样性指数以北坡最高,西坡最低,具体大小为北坡>南坡>西南坡>东北坡>东坡>西北坡>西坡,且西坡和西北坡显著低于其余坡向( $P<0.05$ ),其余坡向之间均不存在显著性差异( $P>0.05$ )(表 3)。

2.4 不同坡向下群落功能群和生活型比较

不同坡向下物种功能群总体呈现出:东坡、南坡、东北坡、北坡和西南坡莎草类重要值最高,西坡和西北坡只有豆科和杂类草,且杂类草重要值最高。其中,东坡莎草类重要值分别是杂类草、豆科和禾草类的 2.52、4.02 和 3.46 倍,南坡分别是 2.53、1.64 和 2.39 倍,东北坡分别是 1.71、2.11 和 1.68 倍,西南坡分别是 1.54、2.36 和 1.92 倍,北坡分别是 1.42、1.72 和 1.92 倍;西坡和西北坡杂类草重要值分别是豆科的 6.34 倍和 2.41 倍。因此,阳坡(南坡)和半阳坡(东坡)莎草类物种重要值大于阴坡(东

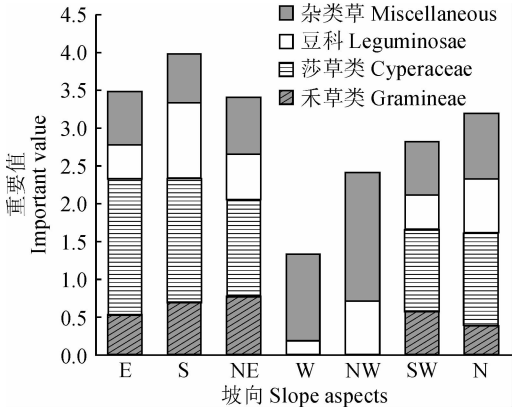


图 2 不同坡向群落功能群比较

Fig. 2 Comparison of functional groups in different slope aspects

北坡和北坡),草地群落中杂类草种类虽多,但重要值相对较低(图 2)。

根据群落物种生活习性、生长高度等,不同坡向物种按照生活型分为 4 种,分别是高位芽、地上芽、地面芽和地下芽。东坡、南坡和西南坡均为地下芽植物重要值最大,说明地下芽植物对群落构建具有较好的作用,高位芽次之,地面芽植物重要值最小,北坡高位芽植物重要值最大,西坡和西北坡均只有高位芽植物;不同坡向物种生活型具体表现为:高位芽植物,东坡>西北坡>南坡>北坡>西南坡>西坡>东北坡,地上芽植物,东北坡>南坡>东坡>西南坡>北坡,地面芽植物,东坡>东北坡>南坡>西南坡>北坡,地下芽植物,东坡>南坡>东北坡>北坡>西南坡(图 3)。

2.5 不同坡向下物种重要值与土壤因子和微生物数量的关系

以土壤因子和微生物数量作为解释变量,每个植物的重要值作为响应变量进行 RDA 分析(图 4)。图中数字表示各个样点(共 21 个),字母加数字表示

各个物种(共 21 种),带有实心箭头的线表示解释变量,箭头连线的长度表示解释变量与物种重要值间的相关程度,直线越长,相关性越强,反之越小,箭头连线和物种越近表示该因子对物种重要值的解释量越大,箭头连线与排序轴的夹角表示该因子与排序轴相关性的大小,夹角越小,相关性越高。

从不同坡向下物种重要值与土壤因子和微生物数量间的关系可知:由于叠加效应,所以剔除细菌数量,土壤全磷含量对物种 S17、S18、S19 和 S20 的影响较大,土壤碳氮比和含水量对物种 S8、S9 和 S10 的影响较大,pH 值、真菌数量和放线菌数量对 S2、S3、S4、S6、S1、S5、S15、S12、S16、S7 和 S14 等物种的影响较大。说明随坡向梯度的变化,土壤因子对植被的贡献不同,当土壤含水量和碳氮比等水平较高时,对瑞香、金露梅和头花杜鹃等灌丛植物在群落中的分布有一定的作用,当土壤中真菌和放线菌数量较少时,对苔草、珠芽蓼、乳白香青和兰石草等植物在群落中的分布有一定的作用,说明草地植被演替与土壤因子变化相关(图 4)。

不同坡向下植被与土壤因子、微生物数量冗余

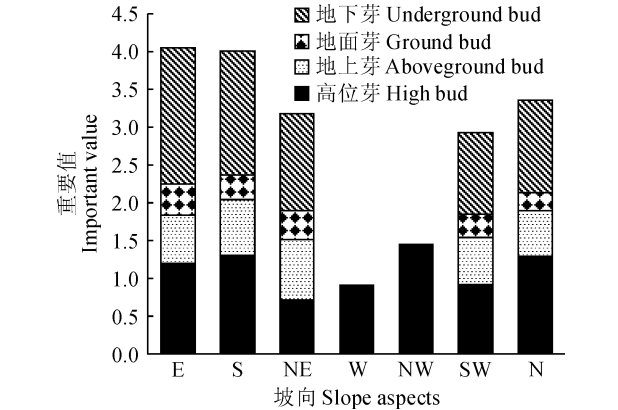


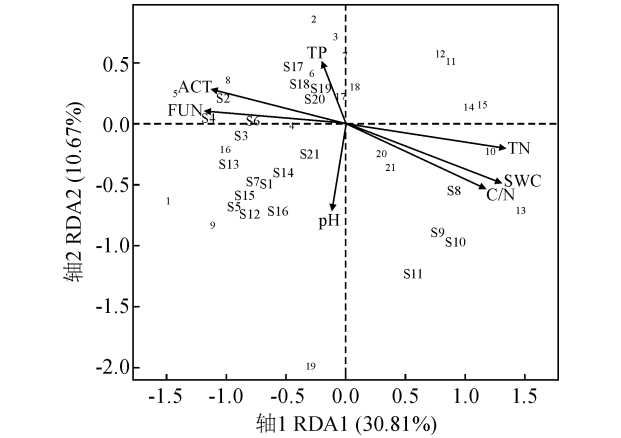
图 3 不同坡向群落生活型比较

Fig. 3 Comparison of life styles in different slope aspects

表 4 物种重要值与土壤因子和微生物数量 RDA 结果

Table 4 RDA results of the important values and soil factors, biological quantity			
参数 Parameter		RDA1	RDA2
特征值 Eigenvalues		6.47	2.24
物种重要值变化百分比 Percentage change in species important value		30.81%	10.67%
物种重要值变化累积百分比 Cumulative percentage change in species important value		30.81%	41.48%
土壤因子、微生物数量—物种重要值变化百分比 Soil factors, microbial population—percentage change in species important value		57.68%	19.98%
土壤因子、物生物数量—物种重要值变化累积百分比 Soil factors, biological quantity—cumulative percentage change of species important value		57.68%	77.66%
蒙特卡罗置换检验 Monte Carlo replacement test			P= 0.002 * *

分析结果(表 4)表明,第一排序轴和第二排序轴特征值分别是 6.47 和 2.24,第一排序轴和第二排序



TN. 土壤全氮; TP. 土壤全磷; C/N. 土壤碳氮比; SWC. 土壤含水量; ACT. 放线菌数量; FUN. 真菌数量; 1~21 表示采样点; S1. 矮嵩草; S2. 苔草; S3. 乳白香青; S4. 珠芽蓼; S5. 天胡荽; S6. 兰石草; S7. 冰草; S8. 瑞香; S9. 金露梅; S10. 头花杜鹃; S11. 鬼箭锦鸡儿; S12. 黄花棘豆; S13. 臭蒿; S14. 火绒草; S15. 黄花苜蓿; S16. 莓叶委陵菜; S17. 鹅绒萎菱菜; S18. 西伯利亚蓼; S19. 扁蓿豆; S20. 垂穗披碱草; S21. 鼠掌老鹳草

图 4 物种重要值与土壤因子和微生物数量 RDA 排序图

TN. Soil total nitrogen; TP. Soil total phosphorus; C/N. Soil carbon to nitrogen ratio; SWC. Soil water content; ACT. Number of actinomycetes; FUN. Number of fungi; 1—21 represent sample plot; S1. *K. humilis*; S2. *Carex supina*; S3. *Anaphalis lactea*; S4. *Polygonum viviparum*; S5. *Hydrocotyle sibthorpioides*; S6. *Lancea tibetica*; S7. *Agropyron cristatum*; S8. *Daphne odora*; S9. *Potentilla fruticosa*; S10. *Rhododendron capitatum*; S11. *Caragana jubata*; S12. *Oxytropis ochrocephala*; S13. *Artemisia hedinii*; S14. *Leontopodium leontopodioides*; S15. *Medicago falcata*; S16. *Potentilla fragarioides*; S17. *P. anserina*; S18. *P. sibiricum*; S19. *Melilotoides ruthenica*; S20. *Elymus nutans*; S21. *Geranium sibiricum*

Fig. 4 RDA ranking of the important values and soil factors, biological quantity

表 5 物种重要值与土壤因子和微生物数量 RDA 排序相关系数

Table 5 Correlation coefficients between the important value and soil factors, biological quantity RDA ranking

土壤因子、微生物数量 Soil factor, number of microorganisms	轴 1 RDA1	轴 2 RDA2	$R^2$	$Pr(>r)$
土壤含水量 Soil water content (SWC)	0.860	−0.510	0.752	0.001***
土壤 pH Soil pH	−0.011	−0.999	0.297	0.042*
土壤全氮 Soil total nitrogen (TN)	0.954	−0.299	0.633	0.001***
土壤全磷 Soil total phosphorus (TP)	−0.352	0.936	0.177	0.183
土壤碳氮比 Soil carbon to nitrogen ratio (C/N)	0.821	−0.571	0.673	0.001***
真菌数量 Number of fungi (FUN)	−0.974	0.225	0.476	0.003**
放线菌数量 Number of actinomycetes (ACT)	−0.913	0.407	0.496	0.002**

注: \*\*\* 表示在 0.001 水平上相关显著, \*\* 表示在 0.01 水平上相关显著, \* 表示在 0.05 水平上相关显著  
Note: \*\*\* indicate that the correlation is significant at the 0.001 level, \*\* indicate a significant correlation at the 0.01 level, and \* indicates a significant correlation at the 0.05 level

轴分别解释 30.81%和 10.67%的物种重要值的变化,土壤因子和微生物数量能解释 41.48%的物种重要值的变化。第一排序轴和第二排序轴分别解释 57.68%和 19.98%的土壤因子、土壤微生物数量的关系变化,说明第一排序轴和第二排序轴能够反映一定物种重要值与土壤因子、土壤微生物数量间的关系。蒙特卡罗置换检验结果极显著( $P<0.01$ ),说明土壤因子和土壤微生物数量能够解释物种的分布(表 4)。

在土壤因子和微生物数量与物种重要值 RDA 排序相关系数中,RDA1 和 RDA2 两列所对应的值表示解释变量与排序轴的相关系数, $R^2$  表示解释变量对物种分布的决定系数(表 5)。按照决定系数排序,结果为:土壤含水量>碳氮比>全氮>放线菌数量>真菌数量>pH 值>全磷,其中,土壤含水量、全氮、碳氮比与物种重要值间为正相关( $Pr<0.001$ ),相关系数分别为 0.860、0.954 和 0.821,pH 值、真菌数量和放线菌数量与物种重要值间为负相关( $Pr<0.05$ ),相关系数分别为 −0.999、−0.974和 −0.913(表 5)。

3 讨 论

植物群落科、属和种能够很好地反映群落特征的变化<sup>[24]</sup>。不同坡向下,群落结构存在差异,其是形成生态位互补的重要条件,并有利于物种在资源利用时产生互补效应,使随着演替的发生植被愈加丰富<sup>[25]</sup>。本研究中物种主要为豆科、菊科、蔷薇科、禾本科和莎草科,其他科物种分布相对较少,这与杨晓玫等研究结果一致,说明这 5 大科植物的生态适应性较强,能较好地适应天祝半干旱气候和土壤贫

瘠的生态环境<sup>[26]</sup>。重要值是评估、计算物种多样性的重要指标,以综合数值表示物种在群落中的相对重要性,其大小是判断优势种和亚优势种的重要指标<sup>[27]</sup>。本研究中,阳坡(西南坡和南坡)优势种以苔草、珠芽蓼和臭蒿等为主,阴坡(西北坡)和半阴坡(西坡)优势种以头花杜鹃和金露梅等为主,阳坡光照强,土壤温度高,水分蒸发大,而有利于耐旱喜阳环境的植物生长,而阴坡光照弱,土壤温度低,有利于喜阴湿环境植物的分蘖和生长,且因为外界因素(风、雨水等)干扰,使阴坡和阳坡均伴随有天胡荽和兰石草等植物出现<sup>[28]</sup>。功能群是根据植物长期对环境的适应性和植物自身的生理、形态等各方面的影响,及某些植物会对生态系统产生相同的作用所形成,并随着外界环境的变化而变化<sup>[29]</sup>。生活型由于植物所处环境的变化和物种的演替所形成<sup>[30]</sup>,是对环境因子趋同适应的结果<sup>[18]</sup>。本研究表明,由阴坡到阳坡梯度上,杂类草和禾草物种重要性降低,莎草类物种重要性增加,这与徐长林<sup>[31]</sup>对不同坡向下高寒草甸群落植被构成的研究结果不同,主要是大多数莎草科植物具有适应性强、返青早、生长期长、根茎发达、耐践踏等优良特性<sup>[32]</sup>,且阴阳坡优势种和植物功能群的不同,也是植物为适应环境所表现出的一种策略。不同坡向下光照差异所引起气温、大气降水和土壤蒸发等环境条件造成各坡向下物种生活型的不同<sup>[4]</sup>,地下芽植物在阳坡和半阳坡比阴坡分布多,高位芽植物多数分布在阴坡,因阴坡一般为灌丛植物,而灌丛植物的根系、叶面积等器官相对较大,对土壤水分、养分等需求较多,而阴坡养分等含量相对较高<sup>[33]</sup>。

不同坡向下光照、土壤含水量和土壤养分等含



量差别很大<sup>[34]</sup>,从而导致坡向影响下植物群落的物种组成和分布也不同<sup>[10]</sup>。植物根据自身的生长习性,选择适宜的环境,长期会形成草地群落特定的结构,以及物种和环境的关系也越加密切,而植物也会表现出对气候等环境条件的适应性,并由于空间尺度的变化,植被对微环境的响应会越加明显<sup>[6]</sup>。物种多样性表示特定区域内物种分布的均匀程度以及该区域所含物种数目的多少<sup>[35]</sup>。而物种丰富度只代表群落中物种数目的多少。本研究中,北坡物种丰富度和香农-威纳多样性指数均最大,Bello 等<sup>[36]</sup>研究表明,物种多样性随土壤湿度的增加而增加,这与本研究结果相同。因为北坡土壤含水量较高,且土壤养分等也不易流失,给植物提供很好的生长环境,以及北坡是草本-灌丛区,物种数目、种类等都较其余坡向丰富,主要以个体植株较小的莎草科植物矮蒿草和金露梅灌丛为主<sup>[31]</sup>。西坡和西北坡物种丰富度和香农-威纳多样性指数均显著低于其余坡( $P<0.05$ )。由于阴坡(西北坡)、半阴坡(西坡)和阳坡相比较,土层较深、土壤发育好以及土壤微生物对枯枝落叶的消化能力强,更适合植物生长,并且阴坡植被覆盖率较大、植物较高等这些特征都会加剧资源竞争,而阳坡植物生长发育受到其生存环境的限制,生态位空间没有充分利用<sup>[37]</sup>。不同坡向下物种均匀度变化不明显( $P>0.05$ ),这与刘旻霞等<sup>[10]</sup>对不同坡向下植物群落多样性研究结果一致。说明种群在小尺度内的聚集分布有利于其形成群体效应,利于自身适应环境并能够增强种间竞争能力,促进种群的正常生长<sup>[38]</sup>,并且物种均匀分布说明种群内部间的生态关系为相互排斥<sup>[39]</sup>。

在一个区域群落中,竞争会导致共存物种间生态学的差异,并且物种的种内、种间和资源等竞争受到土壤水、热等条件的限制,从而影响草地群落物种的分布<sup>[7]</sup>。土壤水分一方面影响土壤养分的转化速率及其运输,另一方面对植物吸收利用土壤养分等会造成很大的影响,且不同植物的根系形态也会影响植物对水分的吸收情况<sup>[39]</sup>。不同的坡向直接影响太阳光的照射,而太阳辐射是生态系统最主要和最直接的能量来源,也是地表温度的主要来源<sup>[31]</sup>。

参考文献:

[1] 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(2): 111-129.  
ZHANG Z H, ZHOU H K, ZHAO X Q, et al. Relationship

一个地区主要植被类型由气候条件决定,但群落物种分布还受到多种土壤因子及其相互作用的影响<sup>[40]</sup>。有研究发现,阳坡光照强度大,地表温度高,表层土壤水分蒸发快,抑制了植物的生长发育,而阴坡土壤水分和养分条件相对较好,利于植物生长。本研究中,土壤含水量和碳氮比对灌丛植物(瑞香、金露梅和头花杜鹃)重要值影响较大,这与刘旻霞等<sup>[10]</sup>的研究结果相似,从植物本身特性考虑,这些植物具有喜湿润、低温的特点,在北半球,太阳辐射较多的南坡,日照时数长,蒸发量大,因此热而干旱;而北坡受到了较少的太阳辐射,日照时数短,蒸发量小,因此比较潮湿、阴冷,有利于这些植物的生存发展,也体现出植物种群对环境异质性的响应策略喜湿润环境<sup>[41]</sup>。总之,坡向导致生境(光照、温度、水分、土壤养分)的不同,对植物群落的物种组成、功能群和生活型等产生重要影响。

4 结 论

(1)坡向显著影响了高寒草甸植物群落的分布,东坡、南坡和东北坡为草本区,西南坡和北坡为草本-灌丛区,西坡和西北坡为灌丛区。阳坡和半阳坡菊科和豆科物种分布较多,阴坡和半阴坡菊科、豆科和蔷薇科物种分布较多。

(2)坡向影响了高寒草甸植被功能群的分布,禾本科植物重要值大小为:阴坡(东北坡)>阳坡(南坡和西南坡)>半阳坡(东坡),莎草科植物重要值大小为半阳坡(东坡)>阳坡(南坡)>阴坡(东北坡和北坡),豆科植物重要值大小为阳坡(南坡)>阴坡[北坡、西北坡和东北坡]>半阳坡(东坡)>半阴坡(西坡)],杂类草植物重要值大小为半阴坡(西坡)>阴坡(北坡和东北坡)>半阳坡(东坡)>阳坡(西南坡和南坡)。

(3)坡向显著影响了高寒草甸植物的物种多样性,随着坡向梯度变化,物种丰富度和香农-威纳多样性指数变化一致,均表现为,阴坡>阳坡>半阳坡>半阴坡。

(4)不同坡向下土壤因子对植被分布的贡献不同,土壤含水量、碳氮比和全氮对物种重要值的影响较大。

between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(2): 111-129.  
[2] BECKAGE B, CLARK J S. Seedling survival and growth of three forest tree species: The role of spatial heterogeneity[J].

- Ecology*, 2003, **84**(7): 1 849-1 861.
- [3] BEHERA S K, MISHRA A K, SAHU N Y, *et al.* The study of microclimate in response to different plant community association in tropical moist deciduous forest from northern India [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2012, **21**(5): 1 159-1 176.
- [4] 张微笑. 地形因子对山区植物生长的影响[J]. 华夏地理, 2015, (3): 76-77.  
ZHANG W X. The influence of topographic factors on the growth of mountain plants[J]. *Huaxia Geography*, 2015, (3): 76-77.
- [5] XUE R, YANG Q, MIAO F, *et al.* Slope aspect influences plant biomass, soil properties and microbial composition in alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, **18**(5): 1-12.
- [6] 聂莹莹, 李新娥, 王 刚. 阳坡-阴坡生境梯度上植物群落  $\alpha$  多样性与  $\beta$  多样性的变化模式及与环境因子的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, **46**(3): 73-79.  
NIE Y Y, LI X E, WANG G. Variation mode of  $\alpha$  diversity and  $\beta$  diversity of plant community of different habitat gradients from south-facing slope to north-facing slope and its relation with different environmental factors [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 2010, **46**(3): 73-79.
- [7] 邱 波, 任青吉, 罗燕江, 等. 高寒草甸不同生境类型植物群落的  $\alpha$  及  $\beta$  多样性研究[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(4): 655-661.  
QIU B, REN Q J, LUO Y J, *et al.* Study on  $\alpha$  diversity and  $\beta$  diversity of plant community of different habitats in alpine meadow [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, **24**(4): 655-661.
- [8] GONG X, BRUECK H, GIESE K M, *et al.* Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**(4): 483-493.
- [9] 赵景学, 曲广鹏, 多吉顿珠, 等. 藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(6): 105-108.  
ZHAO J X, QU G P, DUO J D Z, *et al.* Relationship between species diversity and soil factors of alpine grasslands in north Tibet[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(6): 105-108.
- [10] 保 娅, 达哇卓玛. 高山嵩草群落生物多样性与土壤养分的相关性研究[J]. 青海草业, 2015, **24**(2): 12-15.  
BAO Y, DA W Z M. Study on relationship between *Kobresia pygmaea* community bio-diversity and soil nutrition[J]. *Qinghai Prataculture*, 2015, **24**(2): 12-15.
- [11] 刘旻霞, 马建祖. 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(12): 3 295-3 300.  
LIU M X, MA Z J. Responses of plant functional traits and soil factors to slope aspect in alpine meadow of South Gansu, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(12): 3 295-3 300.
- [12] 王 玉, 安沙舟, 董乙强, 等. 坡向对新疆天山北坡山地草原植被多样性的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, **55**(1): 156-163.  
WANG Y, AN S Z, DONG Y Q, *et al.* Effects of slope aspect on the vegetation diversity of mountain steppe in the northern slope of Tianshan Mountain, Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, **55**(1): 156-163.
- [13] 王 洁, 贾文雄, 赵 珍, 等. 祁连山北坡草甸草原地上生物量与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(1): 36-42, 48.  
WANG J, JIA W X, ZHAO Z, *et al.* Study on the relations between the above ground biomass and the soil physicochemical properties in the North Slope of Qilian Mountains[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(1): 36-42, 48.
- [14] GUSTAVSSON E, LENNARTSSON T, EMANUELSSON M. Land use more than 200 years ago explains current grassland plant diversity in a Swedish agricultural landscape[J]. *Biological Conservation*, 2007, **138**(1-2): 47-59.
- [15] 董世魁, 汤 琳, 王学霞, 等. 青藏高原高寒草地植物多样性测定的最小样地面积[J]. 生物多样性, 2013, **21**(6): 651-657.  
DONG S K, TANG L, WANG X X, *et al.* Minimum plot size for estimating plant biodiversity of the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Biodiversity Science*, 2013, **21**(6): 651-657.
- [16] 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响[J]. 草业科学, 2016, **33**(5): 886-890.  
JI W Z, WANG Q H. Effects of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County [J]. *Pratacultural Science*, 2016, **33**(5): 886-890.
- [17] 苏淑兰, 肖建设, 裴青生, 等. 放牧对高寒草地植被生长的影响及其生物量预测模型构建[J]. 草业科学, 2019, **36**(1): 20-26.  
SU S L, XIAO J S, PEI Q S, *et al.* Effect of grazing on vegetation characters in alpine meadow and its prediction model construction [J]. *Pratacultural Science*, 2019, **36**(1): 20-26.
- [18] RAUNKI R C. The life forms of plants and statistical plant geography[M]. Oxford: Clarendon Press, 1934.
- [19] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(12): 1 170-1 179.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 牛世全, 杨婷婷, 李君锋, 等. 盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系[J]. 干旱区研究, 2011, **28**(2): 328-334.  
NIU S Q, YANG T T, LI J F, *et al.* Seasonal trends of microbial functional groups in saline-alkali soil and their relationship with soil physicochemical factors in the East Hexi Corridor[J]. *Arid Zone Research*, 2011, **28**(2): 328-334.
- [22] 鲍根生, 王宏生, 曾 辉. 有机硅助剂对“狼毒净”防除狼毒效果及草地植物群落多样性的影响[J]. 草业科学, 2015, **32**(2): 263-268.  
BAO G S, WANG H S, ZENG H. Effects of adding organo-silicon adjuvants to Langdujing on enhancing control effect and plant diversity of grassland communities[J]. *Pratacultural Science*, 2015, **32**(2): 263-268.

[23] 赖江山, 米湘成. 基于 Vegan 软件包的生态学数据排序分析 [C]//第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 厦门: 厦门大学, 2012: 332-343.

[24] 何芳兰, 刘世增, 李昌龙, 等. 甘肃河西戈壁植物群落组成特征及其多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(4): 74-78. HE F L, LIU S Z, LI C L, *et al.* Study on composition and diversity of phytocoenosium in Gobi region of Hexi, Gansu [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30**(4): 74-78.

[25] 江小雷. 人工草地植物种多样性对生态系统功能的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.

[26] 杨晓玫, 姚 拓, 王理德, 等. 天祝不同退化程度草地植物群落结构与物种多样性研究[J]. 草地学报, 2018, **26**(6): 1 290-1 297. YANG X M, YAO T, WANG L D, *et al.* Community structure and plant diversity under different degrees of degraded grassland in Tianzhu, Gansu [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, **26**(6): 1 290-1 297.

[27] 陈俊华, 何 飞, 李建彬, 等. 东拉野桂花群落物种多样性及乔木优势种生态位初步研究[J]. 四川林业科技, 2007, **28**(4): 48-51, 9. CHEN J H, HE F, LI J B, *et al.* Primary research on species diversity and niche characteristics of dominant arbor species in *Osmanthus serrulatus* community[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2007, **28**(4): 48-51, 9.

[28] 张建贵, 王理德, 姚 拓, 等. 东祁连山不同退化草地植物群落特征与土壤养分特性[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(1): 227-233. ZHANG J G, WANG L D, YAO T, *et al.* Characteristics of plant community and soil nutrient of different degraded grasslands in east Qilian Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(1): 227-233.

[29] 孙德鑫, 刘 向, 周淑荣. 停止人为去除植物功能群后的高寒草甸多样性恢复过程与群落构建[J]. 生物多样性, 2018, **26**(7): 655-666. SUN D X, LIU X, ZHOU S R. Dynamical changes of diversity and community assembly during recovery from a plant functional group removal experiment in the alpine meadow [J]. *Biodiversity Science*, 2018, **26**(7): 655-666.

[30] 高贤明, 陈灵芝. 植物生活型分类系统的修订及中国暖温带森林植物生活型谱分析[J]. 植物学报, 1998, **40**(6): 553-559. GAO X M, CHEN L Z. The revision of plant life-form system and an analysis of the life-form spectrum of forest plants in the water temperate zone of China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, **40**(6): 553-559.

[31] 徐长林. 坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响[J]. 草业学报, 2016, **25**(4): 26-35. XU C L. Variations in vegetation composition and nutrient characteristics related to aspect in an alpine meadow in the Northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, **25**(4): 26-35.

[32] 马万里, 韩烈保, 罗菊春. 草坪植物的新资源——苔草属植物[J]. 草业科学, 2001, **18**(2): 43-45, 56. MA W L, HAN L B, LUO J C. A new lawn plant resource: genus *Carex* L[J]. *Pratacultural Science*, 2001, **18**(2): 43-45, 56.

[33] 李家湘, 熊高明, 徐文婷, 等. 中国亚热带灌丛植物生活型组成及其与水热因子的相关性[J]. 植物生态学报, 2017, **41**(1): 147-156. LI J X, XIONG G M, XU W T, *et al.* Composition of plant life forms of subtropical shrubland in China and its correlation with temperature and precipitation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, **41**(1): 147-156.

[34] 张 倩, 姚宝辉, 王 缠, 等. 不同坡向高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征[J]. 生态学报, 2019, **39**(9): 3 167-3 174. ZHANG Q, YAO B H, WANG C, *et al.* Soil physical and chemical characteristics and microbial proportions in an alpine meadow with different slopes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(9): 3 167-3 174.

[35] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法 (上)[J]. 生物多样性, 1994, **3**(3): 38-43. MA K P. Method for measuring diversity of biological communities I  $\alpha$  diversity measurement method [J]. *Biodiversity Science*, 1994, **3**(3): 38-43.

[36] DE BELLO F, LEPŠ J, SEBASTIÀ M. Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients[J]. *Ecography*, 2006, **29**(6): 801-810.

[37] WESTOBY M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme[J]. *Plant Soil*, 1998, **199**(199): 213-227.

[38] 韩 路, 王海珍, 彭 杰, 等. 塔里木河上游天然胡杨林种群空间分布格局与动态研究[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(8): 1 668-1 673. HAN L, WANG H Z, PENG J, *et al.* Spatial distribution patterns and dynamics of major population in *Populus euphratica* forest in upper reaches of Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(8): 1 668-1 673.

[39] 马小丽, 赵成章, 张 茜, 等. 退化草地甘肃肃草和冷蒿种群空间格局及关联性[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(2): 299-304. MA X L, ZHAO C Z, ZHANG Q, *et al.* Spatial pattern and spatial association of *Melica przewalskyi* and *Artemisia frigida* in degraded grassland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(2): 299-304.

[40] 姚宝辉, 王 缠, 郭怀亮, 等. 人工草地建设对甘南草原土壤理化特性和微生物数量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(1): 192-199. YAO B H, WANG C, GUO H L, *et al.* Effects of artificial supplementary sowing on soil physical and chemical characteristics and microorganism quantity in Gannan grassland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(1): 192-199.

[41] STERNBERG M, SHOSHANY M. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: comparison of a semiarid and an arid site in Israel[J]. *Ecological Research*, 2001, **16**(2): 335-345.

(编辑: 潘新社)