

DOI: 10.5846/stxb201809091931

李雨, 吴鹏飞, 龙伟, 马金豪. 高寒地区种植不同种类牧草对土壤节肢动物群落的影响. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Li Y, Wu P F, Long W, Ma J H. Effects of different forage species on soil arthropod communities on the Qinghai-Tibetan plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

高寒地区种植不同种类牧草对土壤节肢动物群落的影响

李 雨, 吴鹏飞*, 龙 伟, 马金豪

西南民族大学生命科学与技术学院, 成都 610041

摘要:为了明确高寒地区种植不同种类牧草对土壤节肢动物群落的影响,于 2016 年 7 月,选取 2013 年建植的垂穗披碱草、老芒麦、早熟禾、羊茅、燕麦、苜蓿 6 种牧草地为研究样地,以外围天然草地为对照样地,采集 0—15 cm 混合土样,采用干漏斗法(Tullgren)分离法土壤节肢动物。结果表明:(1)7 种类型牧草种植地对土壤节肢动物群落组成结构、密度、类群数、Shannon 多样性指数和 Simpson 优势度指数均有显著差异性($P < 0.05$ 或 0.01)。群落密度、类群数和 Shannon 多样性指数均表现为燕麦显著高于垂穗披碱草和苜蓿牧草地,而 Simpson 指数与之相反,其他几种牧草地间土壤节肢动物群落指数均无显著差异性。(2)典范对应分析(CCA)结果表明,影响土壤节肢动物群落组成结构的主要因素是土壤 pH、TN、N/P、C/N、AK;其中,在垂穗披碱草样地中土壤节肢动物群落与 pH 呈正相关,在早熟禾样地中土壤节肢动物群落与 TN 和 N/P 呈正相关,而在天然草地中土壤节肢动物群落与 C/N 和 AK 呈正相关。(3)回归分析表明,土壤节肢动物群落密度及多样性指数仅与 TK 含量呈显著正相关($P < 0.05$ 或 0.01)。研究表明,在青藏高原种植不同种类牧草对土壤节肢动物的群落结构、密度和多样性均存在较大的影响。从长远的观点来看,种植苜蓿等其他种类牧草虽然能缓解草畜矛盾,但会降低土壤节肢动物多样性,不利于生物多样性保护和草地生态系统的可持续利用。

关键词:高寒草地;牧草品种;土壤节肢动物;群落多样性

Effects of different forage species on soil arthropod communities on the Qinghai-Tibetan plateau

LI Yu, WU Pengfei*, LONG Wei, MA Jinhao

College of Life Science and Technologies, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

Abstract: The objective of this study was to examine the effects of different forage species on soil arthropod communities in alpine ecosystems. Six grasslands dominated by six different forage species, viz., *Elymus nutans*, *Elymus sibiricus*, *Poa annua*, *Festuca ovina*, *Avena sativa*, and *Medicago sativa*, and a natural grassland (NG) were selected for study in July 2016, in Hongyuan county, northwest Sichuan. Two plots measuring 2 m × 4 m each were setup in each type of grassland. In the each areas, three sampling points were selected by the diagonal method and mixed soil samples in the 0—15 cm layer were collected. and soil arthropods were extracted from soil samples for 48 h at 38 °C using the Tullgren method in the laboratory. (1) There were significant differences in soil arthropod community density, group number, Shannon diversity index and Simpson dominance index among the seven grasslands ($P < 0.05$ or 0.01). The community density, group number and Shannon diversity index showed that *Avena sativa* were significantly higher than *Elymus nutans* and *Medicago sativa*,

基金项目:国家自然科学基金项目(41371270),四川省科技厅应用基础研究计划重点项目(2018JY0556)和重点研发项目(2018SZ0333),四川省教育厅创新团队项目(14TD0049),西南民族大学研究生创新项目(CX2017SZ076)

收稿日期:2018-09-09; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wupf@swun.cn

while the Simpson index was opposite. There was no significant difference in soil arthropod community index among other grassland types. Sex. (2) The results of canonical correspondence analysis (CCA) showed that the composition of soil arthropod community was mainly affected by pH, TN, N/P, C/N, and AK, , among other parameters; and the soil arthropod community was positively correlated with pH in *Elymus nutans* ,with TN and N/P in *P. annua* grassland, and with K in natural grassland.(3) The regression analysis between soil arthropod diversity index showed that only total K had a significant positive correlation ($P < 0.05$ or 0.01). The effects of cultivating different forage species on the community structure, abundance, and diversity of soil arthropods varied among the seven grasslands in the Qinghai-Tibet Plateau. *Clutivating Medicago sativa* and some other forage species will reduce the diversity of soil arthropods, and not benefit biodiversity conservation and the sustainable utilization of grassland ecosystems in the long term, although the contradictions between forage and livestock can be alleviated to some extent. We strongly recommend that a comprehensive ecological assessment should be conducted before planting forage species.

Key Words: alpine grassland; forage grass; soil arthropods; community diversity

青藏高原是地球上海拔最高、面积最大、形成最晚的高原,素有“地球第三极”之称。青藏高原的高寒草地面积为 $1.33 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占高原面积的 58.80% 和我国草地总面积的 30.00%, 是世界上最著名的放牧生态系统和最大的草地系统之一。所以, 青藏高原草地生态系统是我国重要的畜牧业生产基地和生态安全屏障, 在生物多样性保护、水源涵养以及调节全球气候等生态功能方面发挥着不可替代的作用^[1-2]。且维护青藏高原草地生态系统的安全对促进区域发展具有重要意义。但是由于人类长期超载放牧等因素导致高寒草地严重退化^[3], 使得青藏高原草地生态系统不脆弱, 而且其土壤营养和繁殖库活性低, 草地植被更新能力差, 其任何组分衰退后难以恢复^[4]。因此, 相对于天然草地, 建设人工草地可增加饲草产量, 缩短对天然草地的放牧利用时间, 减轻天然草地放牧强度, 在一定程度上缓解草地放牧压力^[5], 且人工草地具有较高和较稳定的生产力^[6]。故近些年在青藏高原人工和半人工草地面积快速增加^[7], 结果对青藏高原土壤动物-土壤-植被产生重要影响。

土壤动物是土壤生态系统的重要组成部分, 其类群组成以及个体数量在土壤凋落物分解、养分循环、土壤结构改善和植物群落演替中扮演着重要的角色^[8-9]。且土壤动物对环境变化敏感^[10], 能够反映生态系统的健康状况, 因此可作为土壤健康的生物指示作用指标。关于人工草地建设与土壤动物关系的研究进展及其分析, 需要补充。但是, 目前关于建植高寒人工草地对土壤动物群落影响研究, 报道较少, 这制约了高寒草地生态系统的科学管理。所以, 本研究以表栖节肢动物为研究对象, 分析青藏高原地区不同种类牧草种植地土壤动物群落组成及多样性演变规律, 旨在为高寒地区人工草地建植和生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于红原县, 地处青藏高原东部, 阿坝藏羌自治州中部, 地理坐标北纬 $31^{\circ}50' - 33^{\circ}22'$, 东经 $101^{\circ}51' - 103^{\circ}23'$, 南距成都 450 km, 北距兰州 640 km, 县城海拔 3504 m。地势为东南向西北倾斜, 地貌具有山原向丘状高原过渡的典型特征。该区属大陆性高原寒温带季风气候, 日温差大, 无绝对无霜期, 年平均气温 1.1°C , 最热的 7 月份气温 10.9°C , 最冷的 1 月份气温 -1.03°C 。雨季主要集中在 6—9 月份, 年降雨量 753 mm。平均相对湿度 71%, 年平均陆地蒸发量 684.2 mm。年平均日照 2417.9 h, 日照百分率 55%, 太阳辐射年总量 $61.5 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。土壤类型主要为亚高山草甸土, 成土母质以中生代三叠系的板岩、砂岩、白云岩、泥灰岩的坡积残积物和全新统第四系的冲积、洪积、堆积物为主。植被类型主要为亚高山草甸, 植被覆盖度为 70%—90%。该区域草甸主要以小嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 和四川嵩草 (*Kobresia setchwanensis*) 为优势种, 伴生种以高山紫菀 (*Aster alpinus*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、草玉梅 (*Anemone rivularis*)、垂穗披碱草 (*Elymus*

nutans)、条叶银莲花(*Anemone trullifolia*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)为主。红原县境内天然草场面积达 $7.76 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占县境总面积的 92.97%。其中, 可利用优质草场面积达 $7.47 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占其草原总面积的 96.3%^[11]。

1.2 人工草地的选取与样地布设

研究样地位于西南民族大学青藏高原畜牧业高科技研发示范基地。2013 年建立了优质牧草种质资源圃, 在种质资源圃内选取植物长势情况最接近种植小区的垂穗披碱草(*Elymus nutans*, S1)、老芒麦(*Elymus sibiricus*, S2)、早熟禾(*Poa annua*, S3)、羊茅(*Festuca ovina*, S4)、燕麦(*Avena sativa*, S5)、苜蓿(*Medicago sativa*, S6) 6 种牧草种植地为研究样地。每种牧草种植地 2 块, 大小为(2 m×4 m), 且每个种植小区的施肥管理措施均相同。此外, 在种质资源圃外围两侧另选 2 块天然草地(Natural grassland, NG)(大小 2 m×4 m)作对照样地。共选取的调查样地 14 块。

1.3 土壤动物采集、分离与鉴定

在选取的每块样地中按对角线法设置 3 个取样点, 采集 0—15 cm 的土样, 装入有编号的塑料袋内, 共采集土壤样品 42 份。实验室内用干漏斗法(Tullgren 法)分离中型土壤节肢动物, 上层空气温度控制在 36℃—38℃, 分离 48 h。根据《中国土壤动物检索图鉴》^[12]和《蜚螨学》^[13]等参考书籍, 在光学显微镜(Olympus SZX16)、倒置显微镜(Olympus IX71)和高级显微镜(Leica DM4000B)等观察仪器下对土壤动物进行鉴定, 一般鉴定到属, 少数鉴定到科, 并统计个体数量。优势类群划分: 个体数占总数 10% 以上者为优势类群, 1%—10% 为常见类群, 1% 以下为稀有类群^[14]。

1.4 土壤样本采集与分析

此外, 在各样地中另采集 3 个混合土壤, 用于分析土壤化学性质。土壤 pH 值采用电位法测定; 土壤有机碳采用水合热重铬酸钾氧化-容量法; 土壤全氮采用硫酸钾-硫酸铜-硒粉消煮, 定氮仪自动分析法; 土壤水解性氮采用碱解扩散法; 土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法; 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法; 土壤全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮火焰光度计法; 土壤速效钾采用中性乙酸铵提取-火焰光度计法^[15]。

1.5 数据分析处理

群落多样性特征采用丰富度指数(用类群数代表)、Shannon 多样性指数 $H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$ 和 Simpson 优势度指数 $C = \sum (P_i)^2$ 表示土壤动物群落多样性。式中 P_i 为第 i 类群的百分比, n_i 为第 i 个物种的个体数量, S 为类群数, N 为土壤动物总个体数。

对服从正态分布的数据, 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 分析不同种类牧草间的土壤理化性质、植物群落参数和土壤动物群落多样性的差异显著性。若差异显著则用 Tukey HSD 法(方差齐性)和 Tamhane's T2(M)法(方差不齐)进行多重比较分析。对于不服从正态分布的数据进行 $\log(x+1)$ 转换, 如果仍不服从正态分布, 则用非参数进行检验。

用 DCA 对样方及群落进行排序, 第一、二排序轴长度均大于 4, 因此选用 CCA 分析(Principal Component Analysis, CCA)对不同样地的土壤节肢动物群落与环境因子的关系进行排序。用多元回归分析土壤环境与土壤动物群落密度、多样性的关系。

数据分析处理分别采用 Microsoft excel 2010 和 IBM SPSS 20.0 和 Canoco for Windows 4.5 软件进行完成。

2 结果

2.1 土壤理化性质

6 种不同牧草样地及天然草地(NG)的土壤化学性质如表 1。在 7 个样地间所观测的 11 个土壤环境因子均存在显著差异性($P < 0.01$ 或 0.05)。天然草地(NG)的有机碳(SOC)、速效钾(AK)、速效磷(AP)、速效氮(AN)、碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)、氮磷比(N/P)含量最高; 羊茅样地(S4)的全钾(TK)、全磷(TP)、全氮

(AN) 含量最高;垂穗披碱草样地(S1)的 pH 含量最高。燕麦样地(S5)的全钾(TK)、速效磷(AP)、碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)的含量最低;苜蓿样地(S6)的有机碳(SOC)、全磷(TP)、全氮(AN)、速效氮(AN)含量最低;老芒麦样地(S2)的 pH 含量最低;垂穗披碱草样地(S1)的碳氮比(C/N)含量最低。

表 1 不同种类牧草样地间的土壤化学性质

Table 1 The soil chemical properties of different forage grasslands

样地 Plot	垂穗披碱草 S1	老芒麦 S2	早熟禾 S3	羊茅 S4	燕麦 S5	苜蓿 S6	天然草地 NG	F	P
pH	5.56±0.06a	5.04±0.07d	5.25±0.08bcd	5.30±0.04bc	5.33±0.06ab	5.38±0.02ab	5.09±0.03cd	10.86	<0.01
土壤有机碳 SOC/(g/kg)	27.87±0.91cd	31.17±0.72bc	29.50±1.31cd	34.04±0.26ab	26.18±0.93de	23.15±0.27e	36.72±1.65a	22.09	<0.01
全钾 TK/(g/kg)	14.60±0.24b	14.92±0.03b	14.15±0.22b	18.60±1.90a	14.17±0.20b	13.22±0.23b	14.98±0.03b	5.42	<0.01
全磷 TP/(g/kg)	0.75±0.02a	0.76±0.01a	0.76±0.02a	0.82±0.02a	0.76±0.02a	0.66±0.02b	0.76±0.01a	6.19	<0.01
全氮 TN/(g/kg)	2.86±0.11b	3.02±0.09ab	3.01±0.12ab	3.36±0.04a	2.62±0.07bc	2.32±0.03c	3.29±0.16a	14.47	<0.01
速效钾 AK/(mg/kg)	117.67±7.50bc	124.60±8.27b	98.61±7.09bc	115.94±3.47bc	105.54±4.59bc	77.81±1.73c	185.26±21.17a	11.89	<0.01
速效磷 AP/(mg/kg)	7.76±0.33ab	7.90±0.43ab	7.71±0.55ab	7.60±0.38ab	6.79±0.03b	6.82±0.49b	9.68±1.19a	2.72	<0.05
速效氮 AN/(mg/kg)	212.82±3.40b	273.29±7.37a	214.23±7.54b	280.32±3.75a	226.41±8.48b	189.38±7.96b	310.79±15.43a	26.97	<0.01
碳氮比 C/N	9.76±0.05d	10.33±0.10b	9.79±0.05cd	10.12±0.04bc	9.97±0.13cd	9.98±0.09cd	11.18±0.04a	40.21	<0.01
碳磷比 C/P	37.12±1.41bc	40.89±1.42bc	38.94±0.84bc	41.68±1.12b	34.84±1.78c	34.94±0.70c	48.17±2.04a	11.01	<0.01
氮磷比 N/P	3.80±0.15abc	3.96±0.15abc	3.98±0.07abc	4.12±0.13ab	3.49±0.16c	3.50±0.09bc	4.31±0.19a	4.73	<0.01

S1:垂穗披碱草 *Elymus nutans*; S2:老芒麦 *Elymus sibiricus*; S3:早熟禾 *Poa annua*; S4:羊茅 *Festuca ovina*; S5:燕麦 *Avena sativa*; 苜蓿 *Medicago sativa*; NG:天然草地 Natural grassland;; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; TK:全钾 Total potassium (K); TP:全磷 Total phosphorus; TN:全氮 Total nitrogen;; AK:速效钾 Available potassium (K); AP:速效磷 Available phosphorus; AN:速效氮 Available nitrogen; C/N:碳氮比 Ratio of C:N; C/P:碳磷比 Ratio of C:P; N/P:氮磷比 Ratio of N:P

2.2 土壤动物群落组成

共分离土壤节肢动物 563 只,隶属于 3 纲 8 目 46 科 86 类(属)(表 2)。在纲层次上对分离得到的土壤动物进行分类,蛛形纲(Arachnida)和弹尾纲(Collembola)为优势类群。其中,蛛形纲(Arachnida)包含 2 目 33 科 42 类,个体数占总捕获量的 47.96%;弹尾纲(Collembola)包含 3 目 9 科 33 类,个体数占总捕获量的 47.96%;余下的昆虫纲包含 3 目 4 科 11 类,个体数占总捕获量的 4.09%。在科水平上对分离得到的土壤动物进行分类,优势类群为等节跳科(Isotomidae)和棘跳科(Onychiuroidea),分别占总捕获量的 25.93%和 11.37%;常见类群包括长角跳科(Entomobryidae)等 20 科,共占总捕获量的 53.82%;稀有类群包括盾螨科(Scutacaridae)等 24 科,占总捕获量的 8.88%。在属水平上,没有优势类群;常见类群包括近缺跳属(*Paranuropsus*)等 20 属,占总捕获量的 61.29%;稀有类群包括小等跳属(*Isotomiella*)等 66 属,占总捕获量的 38.71%。

2.3 土壤动物群落结构

不同种类牧草种植地的土壤动物群落优势类群有一定差异(表 2)。垂穗披碱草样地优势类群为土跳属(*Tullbergia*)(占 11.76%);老芒麦样地优势类群为棘跳属(*Onychiurus*)(占 23.19%)、类符跳属(*Folsomia*)(占 14.49%)和土跳属(*Tullbergia*)(占 11.59%);早熟禾样地为绒螨科(Trombididae)(占 21.51%);羊茅样地为近缺跳属(*Paranuropsus*)(占 20.69%)、绒螨科(Trombididae)(占 12.93%)和类符跳属(*Folsomia*)(占 11.21%);燕麦地为奥甲螨属(*Oppia*)(占 11.73%)、库跳属(*Coloburella*)(占 11.11%);苜蓿样地优势类群为近缺跳属(*Paranuropsus*)(占 25.93%)、棘跳属(*Onychiurus*)(占 14.81%)、奥甲螨属(*Oppia*)(占 11.11%);天然草地优势类群为原大翼甲螨属(*Protokalmna*)(占 16.13%)。A/C 值在天然草地中最高,为 4.60;在老芒麦中最低,为 0.43;其余样地 A/C 值介于 0.43 和 4.60 之间。

2.4 群落密度及多样性差异

单因素方差分析结果表明,6 种人工草地及天然草地间的土壤动物群落多样性也存在差异(图 1)。群落密度、类群数和 Shannon 指数的变化趋势均是从垂穗披碱草(S1)到燕麦(S5)逐渐增加,并高于天然草地(NG);而苜蓿(S6)明显下降。Simpson 指数则呈先下降后上升的趋势,并以燕麦(S5)最低,苜蓿(S6)最高。群落密度、类群数、Shannon 多样性指数和 Simpson 优势度指数均呈显著变化($P<0.05$ 或 0.01)(图 1)。表现

表 2 不同种类牧草样地的土壤节肢动物群落组成及数量
Table 2 Community composition and individual number of soil arthropods of seven different forage grasslands

类群 Groups	垂穗披碱草 S1			老芒麦 S2			早熟禾 S3			羊茅 S4			燕麦 S5			苜蓿 S6			天然草地 NG			合计 Total		
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	
等节跳科 Isotomidae	6	17.65		12	17.39		25	26.88		54	46.55		39	24.07		10	37.04		146			146	25.93	
近缺跳属 <i>Paranuraphorus</i>	2	5.88		2	2.9		9	9.68		24	20.69		8	4.94		7	25.93		52			52	9.24	
类符跳属 <i>Folsomia</i>				10	14.49		7	7.53		13	11.21					2	7.41		32			32	5.68	
库跳属 <i>Coloburella</i>										6	5.17		18	11.11		1	3.7		25			25	4.44	
隐跳属 <i>Cryptopygus</i>	1	2.94					1	1.08					7	4.32					9			9	1.6	
拟缺跳属 <i>Pseudanuraphorus</i>	1	2.94					4	4.3		2	1.72								7			7	1.24	
等节跳属 <i>Isotoma</i>	2	5.88					2	2.15		2	1.72								6			6	1.07	
二刺跳属 <i>Uzelia</i>							2	2.15		4	3.45								6			6	1.07	
小等跳属 <i>Isotomiella</i>													4	2.47					4			4	0.71	
德跳属 <i>Desoria</i>										2	1.72								2			2	0.36	
原等跳属 <i>Proisotoma</i>													2	1.23					2			2	0.36	
符跳属 <i>Folsomia</i>										1	0.86								1			1	0.18	
长角跳科 Entomobryidae	1	2.94											22	13.58		1	3.7		24			24	4.26	
赛跳属 <i>Seira</i>													13	8.02					13			13	2.31	
拟裸长角跳属 <i>Pseudosminella</i>											7		4.32								7	1.24		
长跳属 <i>Entomobrya</i>													2	1.23		1	3.7		2			2	0.36	
鳞长跳属 <i>Lepidocyrtus</i>																			1			1	0.18	
裸长角跳属 <i>Smilla</i>	1	2.94																	1			1	0.18	
驼跳科 Cyphoderidae										1	1.45								1			1	0.18	
刺驼跳属 <i>Cyphoderopsis</i>				1	1.45														1			1	0.18	
长角长跳科 Orcheselidae																								
长角长跳属 <i>Orcheselides</i>													1	0.62					1			1	0.18	
棘跳科 Onychiuroidea	4	11.76		24	34.78		1	1.08		10	8.62		11	6.79		6	22.22		8			64	11.37	
棘跳属 <i>Onychiurus</i>				16	23.19					3	2.59		4	2.47		4	14.81		6			33	5.86	
土跳属 <i>Tullbergia</i>	4	11.76		8	11.59		1	1.08		7	6.03		7	4.32		2	7.41		2			31	5.51	
球角跳科 Hypogastruridae	1	2.94					1	1.08		3	2.59		2	1.23					2			9	1.6	
球角跳属 <i>Hypogastrura</i>							1	1.08		1	0.86		1	0.62				2			5	0.89		
奇跳属 <i>Xenylla</i>										2	1.72		1	0.62					3			3	0.53	
四刺球角跳属 <i>Chinogastrura</i>	1	2.94																	1			1	0.18	
跳虫科 Poduridae	3	8.82		5	7.25					1	0.86								9			9	1.6	

续表

类群 Groups	垂穗披碱草 S1			老芒麦 S2			早熟禾 S3			羊茅 S4			燕麦 S5			苜蓿 S6			天然草地 NC			合计 Total		
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%
跳虫属 <i>Podura</i>	3	8.82		5	7.25		1	0.86		1	0.86								9			9	1.6	
疣跳科 Neanidae										3	2.59		5	3.09		1	3.7					9	1.6	
副跳属 <i>Paranura</i>										2	1.72		1	0.62		1	3.7					4	0.71	
短吻跳属 <i>Brachystomella</i>										1	0.86		1	0.62								2	0.36	
奇刺跳属 <i>Friesea</i>													2	1.23								2	0.36	
具齿跳属 <i>Odontella</i>													1	0.62								1	0.18	
圆跳科 Sminthuridae				2	2.9	1.08	1	1.08		3	2.59		1	0.62								7	1.24	
球圆跳属 <i>Sphaeridia</i>						1.08	1	1.08		1	0.86											2	0.36	
小圆跳属 <i>Sminthurinus</i>				1	1.45		1			1	0.86											2	0.36	
齿棘圆跳属 <i>Arrhopalites</i>				1	1.45																	1	0.18	
环角圆跳属 <i>Penobrix</i>							1			1	0.86											1	0.18	
吉圆跳属 <i>Yosiodes</i>													1	0.62								1	0.18	
线蛭科 Trombididae				2	2.9	21.51	20	21.51		15	12.93								2	3.23		39	6.93	
奥甲蛭属 <i>Oppida</i>							1	0.86		1	0.86		24	14.81		5	18.52		7	11.29		37	6.57	
奥甲蛭属 <i>Oppia</i>													19	11.73		3	11.11		4	6.45		26	4.62	
拉奥甲蛭属 <i>Lauroppia</i>													5	3.09		2	7.41		3	4.84		10	1.78	
微奥甲蛭属 <i>Microppia</i>							1	0.86														1	0.18	
矮蒲满科 Pygmephoridae				2	2.9	4.3	4	4.3		5	4.31		4	2.47		1	3.7		3	4.84		19	3.37	
麦氏蛭属 <i>Mahunkania</i>				2	2.9	4.3	4	4.3		3	2.59					1	3.7		2	3.23		12	2.13	
矮蒲蛭属 <i>Pygmephorus</i>										2	1.72		2	1.23				1	1.61			5	0.89	
板蒲蛭属 <i>Petalomium</i>													2	1.23								2	0.36	
叶爪蛭科 Penthaletidae				5	7.25		4	4.3		3	2.59											12	2.13	
赤蛭科 Erythraeidae							7	7.53		3	2.59											10	1.78	
副大翼甲蛭科 Parakalumnidae																								
原大翼甲蛭属 <i>Prokalamna</i>							9	9.68											16.13	10		1.78		
喜蛭科 Tetracaridae																			16.13	10				
珠甲蛭科 Danaeidae													4	2.47					4	6.45		8	1.42	
珠甲蛭属 <i>Damaeus</i>													4	2.47								4	0.71	
珠足甲蛭属 <i>Belba</i>																			3	4.84		3	0.53	
表珠甲蛭属 <i>Epidamaeus</i>																			1	1.61		1	0.18	
微离蛭科 Microdispidae							3	2.59					1	0.62					3	4.84		7	1.24	

续表

类群 Groups	垂穗披碱草 S1			老芒麦 S2			早熟禾 S3			羊茅 S4			燕麦 S5			苜蓿 S6			天然草地 NC			合计 Total		
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	百分比 Percent/%
奇肢螨属 <i>Allopygmephorus</i>																								
叶螨科 Tetranychidae				1	1.45		3	3.23		1	0.86								2	3.23		7	1.24	
跗线螨科 Tarsonemidae	1	2.94					3	2.59		3	2.59								3	4.84		7	1.24	
盾螨科 Scutacaridae							1	0.86		1	0.86		3	1.85					1	1.61		5	0.89	
小黑螨科 Caligonellidae							4	4.3		1	0.86											5	0.89	
小黑螨属 <i>Caligomella</i>							4	4.3														4	0.71	
新鄂螨属 <i>Noognathus</i>							1	0.86														1	0.18	
隐颚螨科 Cryptognathidae	1	2.94		2	2.9		1	1.08														4	0.71	
大赤螨科 Anyidae	2	5.88																				2	0.36	
莓螨科 Rhagididae							1	1.08								1	3.7					2	0.36	
异趾莓螨属 <i>Poecilophysis</i>							1	1.08								1	3.7					2	0.36	
檐形螨科 Penthelodidae																								
异珠足甲螨科 Heterobelbidae							1																	
异珠足甲螨属 <i>Heterobelba</i>																			2	3.23	2	0.36		
长须螨科 Stigmaeidae	2	5.88																	2			2	0.36	
真长须螨属 <i>Eustigmaeus</i>	2	5.88																	2			2	0.36	
巨须螨科 Cunaxidae							1	0.86														1	0.18	
拟巨须螨属 <i>Cunaxoides</i>							1	0.86		1	0.86											1	0.18	
盲蛛螨科 Caeculidae							1	0.86														1	0.18	
瘤螨科 Pyemotidae							1	0.86														1	0.18	
沙足甲螨科 Eremobelbidae													1	0.62								1	0.18	
沙足甲螨属 <i>Eremobelba</i>													1	0.62								1	0.18	
水螨科 Hydrachnidae	1	2.94																				1	0.18	
吸螨科 Bdellidae	1	2.94																				1	0.18	
双瘤吸螨属 <i>Bisctrus</i>	1	2.94																				1	0.18	
美绥螨科 Ameroseiidae				4	5.8		4	4.3					24	14.81		1	3.7		8	12.9		41	7.28	
美绥螨属 <i>Ameroseius</i>				4	5.8		4	4.3					10	6.17		1	3.7		5	8.06		24	4.26	
克螨属 <i>Kleannia</i>													14	8.64				3	4.84			17	3.02	
表刻螨科 Epicrius							5	5.38					8	4.94				1	1.61			14	2.49	
绥螨科 Sejidae													6	3.7								6	1.07	
维螨科 Veigaidae	1	2.94					3	3.23														4	0.71	

续表

类群 Groups	垂穗披碱草 S1		老芒麦 S2		早熟禾 S3		羊茅 S4		燕麦 S5		苜蓿 S6		天然草地 NC		合计 Total	
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	个体数 Individuals	百分比 Percent/%
维螋属 <i>Veigia</i>			3	3.23											3	0.53
革厉螋属 <i>Gamasolaelaps</i>	1	2.94													1	0.18
寄螋科 Parasitidae			2	2.9					2	1.23					4	0.71
植绥螋科 Phytoseiidae	3	8.82													3	0.53
虫穴螋科 Zerconidae									2	1.23					2	0.36
厚厉螋科 Pachylaelapidae			1	1.45											1	0.18
厚绥螋属 <i>Pachyzeius</i>			1	1.45											1	0.18
蚊科 Formicidae	2	5.88	5	7.25	3	2.59	2	1.23	2	1.23	1	3.7	6	9.68	19	3.37
拟猛切叶蚁属 <i>Tetraponera</i>			2	2.9	3	2.59							4	6.45	9	1.6
小家蚁属 <i>Monomorium</i>							2	1.23	2	1.23	1	3.7			3	0.53
草蚁属 <i>Lasius</i>			2	2.9											2	0.36
穴臭蚁属 <i>Bohriomyrmex</i>													1	1.61	1	0.18
双节行军蚁属 <i>Aenictus</i>			1	1.45											1	0.18
寡节切叶蚁属 <i>Oligomyrmex</i>													1	1.61	1	0.18
狂蚁属 <i>Paratrechina</i>	1	2.94													1	0.18
蚁属 <i>Formica</i>	1	2.94													1	0.18
鼻蟭科 Rhinotermitidae	2	5.88													2	0.36
乳蜚属 <i>Coptoermes</i>	2	5.88													2	0.36
步甲科 Carabidae	1	2.94													1	0.18
隐翅虫科 Staphylinidae			1	1.45											1	0.18
总数量 Total individual	34	100	69	100	93	100	116	100	162	100	27	100	62	100	563	100
总类群数 Total groups	21		20		21		33		33		13		22		86	
A/C Ratio of Acari/Collembola	0.93		0.43		2.32		0.53		0.98		0.44		4.60		1.00	

为燕麦显著高于垂穗披碱草和苜蓿牧草地,而其他几种类型的牧草种植地无显著差异性,Simpson 指数则与之相反,表现为燕麦显著低于垂穗披碱草和苜蓿牧草地,而其他几种类型的牧草种植地亦无显著差异性。

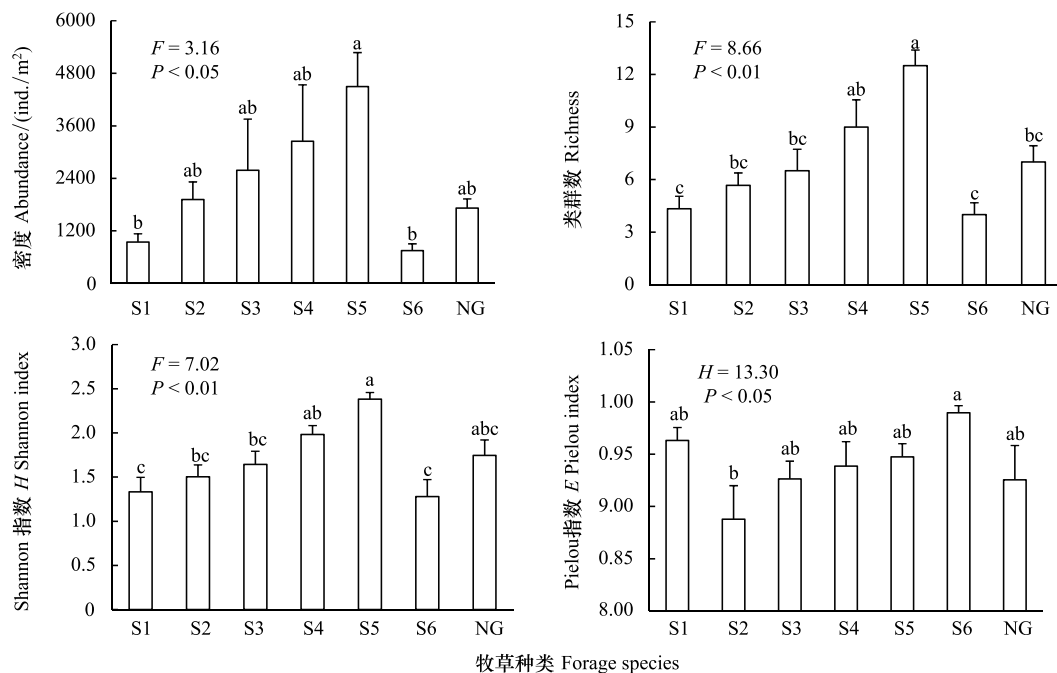


图1 不同种类牧草样地间土壤节肢动物群落多样性(平均值±标准误)

Fig.1 Diversity indices of the soil arthropod communities among different forage grass

S1:垂穗披碱草 *Elymus nutans*; S2:老芒麦 *Elymus sibiricus*; S3:早熟禾 *Poa annua*; S4:羊茅 *Festuca ovina*; S5:燕麦 *Avena sativa*; 苜蓿 *Medicago sativa*; NG:天然草地 Natural grassland; H:非参数检验 Thenon-parametric Kruskal-Wallis test

2.5 土壤环境与土壤动物的关系

由典范对应分析(CCA)对各种牧草种植地土壤动物群落排序结果(图2)表明,第一排序轴与 pH 碳氮比(C/N)、速效钾(AK)等环境因子有较高的相关性,第二排序轴与 pH、氮磷比(N/P)、碳磷比(C/P)、全氮(TN)等环境因子的相关性较高。

由图2还可知,垂穗披碱草、早熟禾、羊茅与天然草地间的土壤动物群落结构差异明显;垂穗披碱草、早熟禾、羊茅、燕麦四种人工草地间的土壤动物群落结构差异明显;此外,而苜蓿与垂穗披碱草、早熟禾的土壤动物群落结构也存在明显差异。不同样地中土壤节肢动物群落所受的影响因子不同。在垂穗披碱草样地(S1)中土壤节肢动物群落主要与 pH 呈正相关,在早熟禾样地(S3)中与 TN 和 N/P 呈正相关,在天然草地(NG)中与 C/N 和 AK 呈正相关。

此外,土壤节肢动物群落密度及多样性与环境因子的回归分析结果表明,全钾含量对土壤节肢动物群落密度($r = 0.44, P < 0.01$)及多样性($r = 0.32, P < 0.05$)有正相关的影响。

3 讨论

3.1 人工草地与天然草地间土壤节肢动物群落差异

大量研究表明植物群落的物种组成结构及多样性对土壤动物群落有重要影响^[16-17]。本研究发现,人工草地土壤节肢动物的群落结构、密度及多样性与天然草地间有明显差异。与人工草地相比,天然高寒草地植物群落的物种多样性及功能群的多样性相对较高^[18-19]。植物群落多样性下降可以显著降低土壤动物群落结构复杂性及多样性^[20-21]。植物群落功能群组成也是影响土壤动物群落的重要因素^[17],不同功能群的植物体内营养物质含量存在差异^[19],可为各类土壤动物提供多样化的食物资源^[22-23],亦对其产生直接影响,还能通

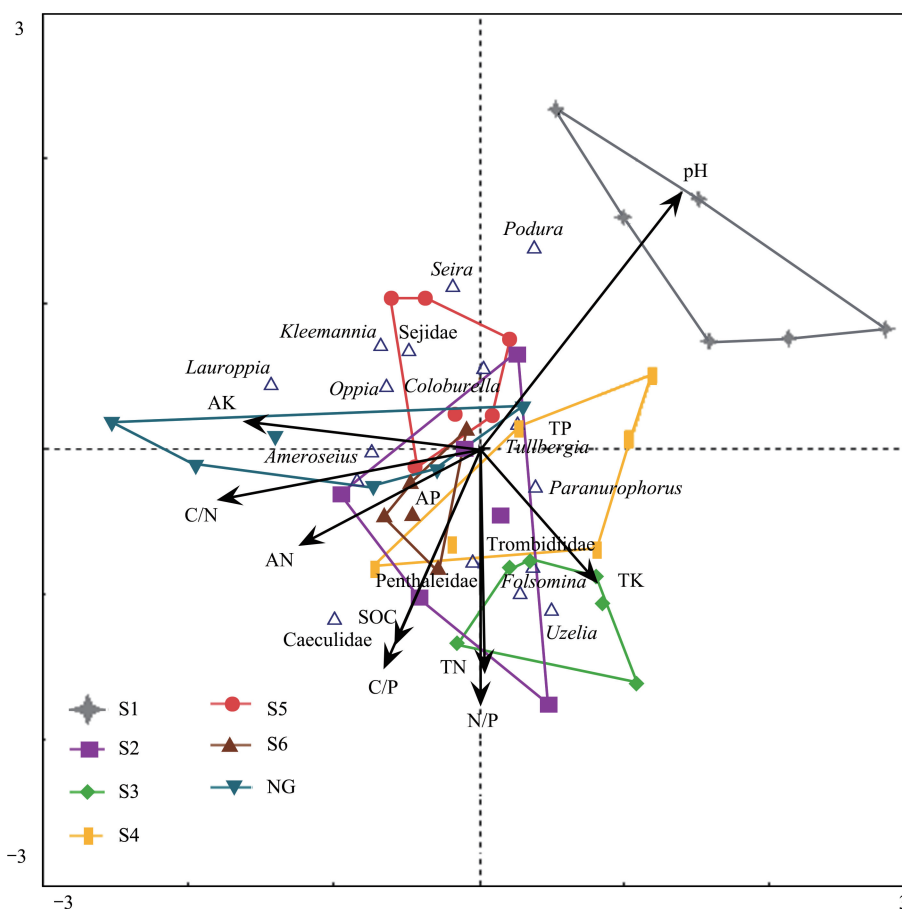


图2 土壤节肢动物群落与土壤环境因子的典范对应分析

Fig.2 Canonical correspondence analysis between the soil arthropod communities and environment factors

S1:垂穗披碱草 *Elymus nutans*; S2:老芒麦 *Elymus sibiricus*; S3:早熟禾 *Poa annua*; S4:羊茅 *Festuca ovina*; S5:燕麦 *Avena sativa*; 苜蓿 *Medicago sativa*; NG:天然草地 Natural grassland; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; TK:全钾 Total potassium (K); TP:全磷 Total phosphorus; TN:全氮 Total nitrogen; AK:速效钾 Available potassium (K); AP:速效磷 Available phosphorus; AN:速效氮 Available nitrogen; 碳氮比 Ratio of C:N; C/P:碳磷比 Ratio of C:P; N/P:氮磷比 Ratio of N:P

过影响土壤理化性质等对土壤动物群落产生间接影响^[24]。土壤理化因子是土壤节肢动物生存的条件,制约其分布,同时土壤节肢动物也可通过自身活动来改变土壤环境,因此土壤节肢动物与土壤环境是相互影响的^[25]。本研究发现土壤 pH、TN、AK、N/P 对土壤动物群落组成有影响,但不同牧草样地土壤动物所受的影响因子不同,说明不同种类牧草样地土壤环境因子的差异能够影响土壤动物的群落组成。本研究还发现土壤全钾含量与土壤节肢动物的密度和类群数呈显著正相关,表明土壤钾含量是影响土壤节肢动物群落的重要因子,这与其他研究得到的结果一致^[26-27]。研究发现在一定范围内提高土壤钾含量能促进植物对氮的吸收,提高植物的生物量^[28-31],而植物是土壤节肢动物主要的直接和间接食物来源^[32]。因此,适当增加土壤全钾含量能够提高土壤节肢动物的密度和类群数。其他研究还发现土壤动物的群落密度与 pH 值呈负相关,与有机质、氮、磷含量呈正相关^[33-34]。本研究中虽然土壤 pH、有机质、全氮、全磷等与土壤节肢动物的密度等无显著相关,但其变化趋势总体上与土壤动物群落多样性动态基本一致。

此外,人工草地植物群落的高度、盖度和密度等与天然高草地间也存在明显不同^[35]。已有研究发现食物资源和环境条件是影响土壤动物多样性和密度的主要因素^[36]。因此,人工草地与天然草地间植物群落多样性、结构及功能群组成方面的差异也是导致土壤节肢动物群落变化的原因。

3.2 人工草地间土壤节肢动物群落差异

不同种类牧草的人工草地间土壤节肢动物群落的组成结构、密度及多样性也存在明显差异,其中群落密

度和多样性以燕麦样地最高,以垂穗披碱草和苜蓿样地最低。其原因可能有以下两方面。第一、不同牧草植株形态差异导致群落小气候不同,影响土壤节肢动物群落组成和多样性。燕麦、早熟禾等为一年生单子叶禾本科植物^[37],草层株丛稀疏,叶面积指数小,对光能利用率相对较低^[38]。垂穗披碱草属于多年生、上繁疏松型禾草^[39],对土壤养分、水分以及光照的利用率高^[40];而苜蓿属于多年生上繁型豆科牧草,植株较高,覆盖地表更严密,群落内的通风、透光性等小气候条件较差,基部光照强度更低^[41]。已有研究表明植物群落结构或生境复杂性可影响土壤动物群落结构^[35]。植物群落结构变化可通过群落内部的太阳辐射、温湿度等小气候对土壤动物产生直接和间接影响^[23,42],较多的太阳辐射有利于提高土壤动物密度和多样性^[16]。第二、不同牧草植株营养物质含量的差异也可能是影响土壤动物群落的原因。在6种牧草中,粗蛋白含量苜蓿最高,燕麦和垂穗披碱草次之;粗脂肪含量燕麦最高,苜蓿次之,垂穗披碱草最低;粗纤维含量以早熟禾和燕麦最高,苜蓿最低;粗灰分含量苜蓿与燕麦含量几乎一致,均大于垂穗披碱草^[43-45]。一般来讲,牧草的粗纤维含量越高,消化率越低,其营养价值越低^[46]。从植株营养物质含量综合考虑,6种牧草中苜蓿的营养成分最高,燕麦和垂穗披碱草次之。目前关于植株营养物质含量对土壤节肢动物群落多样性的研究很少,无法给出有力的证据。从本研究结果来看,造成不同牧草样地间土壤节肢动物群落密度、类群数、Shannon 多样性指数等差异的关键环境因子还不清楚,可能是群落小气候、植株体内营养物质含量或分泌物等因素共同作用的结果,需要进一步开展相关研究。

4 结论

本文研究结果表明,在青藏高原上种植不同种类牧草对土壤节肢动物的群落结构、密度和多样性的影响存在较大的差异。苜蓿牧草虽然能缓解草畜矛盾,但会导致土壤节肢动物多样性显著下降,而种植燕麦和羊茅对于提高土壤动物多样性具有积极作用。从长远的观点来看,种植苜蓿等牧草不利于土壤动物多样性保护和生态系统的可持续利用,而种植燕麦和羊茅有利于高寒草地土壤动物多样性及其草地生态系统。青藏高原上的高寒草甸是一个脆弱的生态系统,一旦遭到破坏很难恢复。建议在大规模建植人工草地之前,对将要种植的牧草种类开展全面的生态评估,以促进该区域的长期可持续发展。希望本文的研究发现能够受到相关部门和人员的重视。

参考文献 (References):

- [1] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 郑度. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. 山地学报, 2003, 21(1): 50-55.
- [2] Du M Y, Kawashima S, Yonemura S, Zhang X Z, Chen S B. Mutual influence between human activities and climate change in the Tibetan Plateau during recent years. Global and Planetary Change, 2004, 41(3/4): 241-249.
- [3] 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. 草业科学, 2002, 19(9): 1-5.
- [4] 尚占环, 龙瑞军. 青藏高原“黑土型”退化草地成因与恢复. 生态学杂志, 2005, 24(6): 652-656.
- [5] 王万林, 王建华, 阿不都卡哈尔, 李超, 安沙舟. 高寒地区人工草地建植技术与效益初步分析. 草食家畜, 2011, (4): 58-61.
- [6] 郑慧莹, 李建东. 松嫩平原的草地植被及其利用保护. 北京: 科学出版社, 1993.
- [7] 贺有龙, 周华坤, 赵新全, 来德珍, 赵建中. 青藏高原高寒草地的退化及其恢复. 草业与畜牧, 2008, (11): 1-9.
- [8] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 868-876.
- [9] 殷秀琴, 宋博, 董炜华, 辛未冬. 我国土壤动物生态地理研究进展. 地理学报, 2010, 65(1): 91-102.
- [10] 苏越, 邬天媛, 张雪萍. 我国土壤动物环境指示功能研究进展. 国土与自然资源研究, 2011, (6): 64-67.
- [11] 鲁岩, 颜玲, 唐川江, 张绪校, 周俗. 红原草地植被覆盖度遥感信息提取与动态变化. 四川地质学报, 2014, 34(4): 615-619.
- [12] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [13] 李隆术, 李云瑞. 蜚蠊学. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [14] 林英华, 张夫道, 杨学云, 宝德俊, 石孝均, 王胜佳, 王伯仁. 农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究. 中国农业科学, 2004, 37(6): 871-877.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

- [16] Salmon S, Artuso N, Frizzera L, Zampedri R. Relationships between soil fauna communities and humus forms; response to forest dynamics and solar radiation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1707-1715.
- [17] Symstad A J, Siemann E, Haarstad J. An experimental test of the effect of plant functional group diversity on arthropod diversity. *Oikos*, 2000, 89(2): 243-253.
- [18] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 施建军, 杜岩功, 龙瑞军. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2426-2431.
- [19] 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚. 基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究. *环境科学*, 2014, 35(3): 1131-1137.
- [20] Eisenhauer N, Migunova V D, Ackermann M, Ruess L, Scheu S. Changes in plant species richness induce functional shifts in soil nematode communities in experimental grassland. *PLoS One*, 2011, 6(9): e24087.
- [21] Menta C, Leoni A, Gardi C, Conti F D. Are grasslands important habitats for soil microarthropod conservation? *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20(5): 1073-1087.
- [22] Franklin E, Magnusson W E, Luizão F J. Relative effects of biotic and abiotic factors on the composition of soil invertebrate communities in an Amazonian savanna. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(3): 259-273.
- [23] Irmeler U. Climatic and litter fall effects on Collembolan and Oribatid mite species and communities in a beech wood based on a 7 years investigation. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(1): 51-62.
- [24] Cakir M, Makineci E. Humus characteristics and seasonal changes of soil arthropod communities in a natural sessile oak (*Quercus petraea* L.) stand and adjacent Austrian pine (*Pinus nigra* Arnold) plantation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(11): 8943-8955.
- [25] 罗金明, 尹雄锐, 叶雅杰, 王永洁. 大中型土壤动物对内陆盐沼沿退化序列环境的指示研究. *草业学报*, 2014, 23(2): 287-295.
- [26] 朱新玉, 董志新, 况福虹, 朱波. 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响. *生态学报*, 2013, 33(2): 464-474.
- [27] 龙伟, 高艳美, 吴鹏飞. 若尔盖高寒草甸退化对表栖节肢动物群落的影响. *生态学报*, 2018, 37(1): 128-138.
- [28] 田福平, 李锦华, 张小甫, 余成群, 王春梅, 张怀山, 黄秀霞. 钾肥对西藏垂穗披碱草种子产量的影响. *种子*, 2010, 29(12): 9-12, 17-17.
- [29] 韩德梁, 徐智明, 艾琳, 韩烈保. 磷肥和钾肥对老龄多叶老芒麦牧草生物量和品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1486-1490.
- [30] 刘文辉, 周青平, 贾志锋, 梁国玲. 施钾对青引 1 号燕麦草产量及根系的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 419-424.
- [31] 邢月华, 谢甫维, 汪仁, 安景文, 华利民, 解占军. 钾肥对苜蓿光合特性和品质的影响. *草业科学*, 2005, 22(12): 40-43.
- [32] 苏永春, 勾影波, 张忠恒, 张崇邦. 东北高寒地区土壤动物和微生物的生态特征研究. *生态学报*, 2001, 21(10): 1613-1619.
- [33] 林英华, 朱平, 张夫道, 彭畅, 高洪军, 刘淑环. 吉林黑土区不同施肥条件下农田土壤动物组成及多样性变化. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 412-419.
- [34] 吴玉红, 蔡青年, 林超文, 黄晶晶, 程序. 地埂植物篱对大型土壤动物多样性的影响. *生态学报*, 2009, 29(10): 5320-5329.
- [35] Saitoh S, Fujii S, Takeda H. Effect of habitat structural complexity on collembolan communities. *Ecological Research*, 2014, 29(1): 81-90.
- [36] 赵哈林, 刘任涛, 周瑞莲, 曲浩, 潘成臣, 王燕, 李瑾. 沙漠化对科尔沁沙质草地大型土壤动物群落的影响及其成因分析. *草业学报*, 2013, 22(3): 70-77.
- [37] 刘文辉, 贾志锋, 周青平, 颜红波. 施磷对青引 1 号燕麦种子产量和产量性状的影响. *土壤通报*, 2010, 41(3): 651-655.
- [38] 杨发林. 高寒牧区燕麦人工草地的植物量动态及其与环境因子间的关系. *草业科学*, 1990, 7(6): 65-69.
- [39] 李昂, 吕正文, 顾梦鹤, 张世挺, 周显辉, 杜国祯. 施肥和刈割对混播草地生物量的影响. *草业科学*, 2008, 25(7): 83-86.
- [40] 刘蓉, 张卫国, 江小雷, 张军. 垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究. *草业科学*, 2010, 27(10): 96-103.
- [41] 杨恒山, 刘江, 张宏宇, 刘晶, 梁怀宇. 不同播种方式下苜蓿与无芒雀麦人工草地的小气候特征分析. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 175-179, 184-184.
- [42] Ammer S, Weber K, Abs C, Ammer C, Prietzel J. Factors influencing the distribution and abundance of earthworm communities in pure and converted Scots pine stands. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(1): 10-21.
- [43] 刘敏, 龚吉蕊, 王忆慧, 张梓榆, 徐沙, 罗亲普. 豆禾混播建植人工草地对牧草产量和草质的影响. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 179-185.
- [44] 汪新川, 周华坤, 雷占兰. 青海牧区 8 种矮禾草生产经济性性状品比试验. *黑龙江畜牧兽医*, 2015, (2): 101-103, 107-107.
- [45] 葛剑, 杨翠军, 杨志敏, 白雪梅, 赵海香, 刘贵河. 紫花苜蓿和裸燕麦混贮发酵品质和营养成分分析. *草业学报*, 2015, 24(4): 104-113.
- [46] 李超, 安沙舟, 周小丽, 范天文, 李海. 昭苏马场季节草地牧草经济类群营养成分初步分析. *新疆农业科学*, 2012, 49(9): 1681-1687.