

武振丹, 红梅, 马尚飞, 卢俊艳, 裴志福, 杨殿林. 长期养分添加对贝加尔针茅草原中小型土壤节肢动物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (6): 1534-1541

Wu ZD, Hong M, Ma SF, Lu JY, Pei ZF, Yang DL. Effects of long-term nutrient addition on meso-micro soil arthropod communities in a *Stipa baicalensis* grassland [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28 (6): 1534-1541

长期养分添加对贝加尔针茅草原中小型土壤节肢动物群落的影响

武振丹¹ 红梅^{1,2}✉ 马尚飞¹ 卢俊艳¹ 裴志福¹ 杨殿林³

¹内蒙古农业大学 呼和浩特 010011

²内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室 呼和浩特 010011

³农业农村部环境保护科研监测所 天津 300191

摘要 为解析养分添加对贝加尔针茅草原中小型土壤动物群落的影响,于2010年在内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗贝加尔针茅草原设计氮磷添加试验,研究施N、P和NP混合施入(其中N和P的施入量均为100 kg hm⁻² a⁻¹)对土壤动物群落结构和多样性的变化及其与环境因子之间的关系.土壤动物于2019年牧草返青期(5月)、生长期(8月)和枯黄期(9月末)进行采集.结果显示,与对照相比,N和NP添加使土壤动物个体数显著增加了1.38倍和1.15倍,类群数显著增加28.57%和21.43%,P处理土壤动物个体数和类群数高于对照,但未达到显著水平;(2)试验区植被生长期(8月)良好的水热条件更适合土壤动物群落的发展;(3)冗余分析(RDA)的结果进一步表明,土壤动物的群落组成主要受pH和植物均匀度影响,且pH是控制中小型土壤动物群落变化的主要因子.本研究揭示长期的养分添加通过改变植物均匀度与土壤pH对中小型土壤节肢动物群落产生积极影响,且土壤pH比植物均匀度的贡献更大.(图6表3参37)

关键词 氮磷添加; 草甸草原; 中小型土壤节肢动物群落; 环境因子

Effects of long-term nutrient addition on meso-micro soil arthropod communities in a *Stipa baicalensis* grassland

WU Zhendan¹, HONG Mei^{1,2}✉, MA Shangfei¹, LU Junyan¹, PEI Zhifu¹ & YANG Dianlin³

¹Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, 010011, China

²Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Huhhot, 010011, China

³Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Tianjin 300191, China

Abstract To analyze the effect of nutrient addition on small- and medium-sized soil arthropod communities in a *Stipa Baikal* meadow grassland, a nitrogen (N) and phosphorus (P) addition experiment was designed in the *Stipa Baikal* meadow grassland at Ewenki Banner, Hulunbeier City, Inner Mongolia, China in 2010. Changes in the structure and diversity of soil arthropod communities and their relationship with environmental factors were studied. Soil arthropod samples were collected during the forage greening (May), growth (August), and yellowing (end of September) periods in 2019. The results showed that: (1) compared to the control sample, N-added and NP-added samples had higher number of soil arthropods by 1.38 and 1.15 times, respectively, and an increase of 28.57% and 21.43% in the number of soil arthropod groups. The numbers of individual as well as groups of soil arthropods tended to increase with P addition; however, this response did not reach a significant level. (2) The water and heat conditions during the vegetation growth period in the test area were more suitable for the development of soil fauna communities. (3) The redundancy analysis (RDA) results further indicated that the community composition of soil fauna is mainly regulated by pH and plant evenness, and soil pH is particularly important in mediating changes in small- and medium-sized soil fauna communities. This study suggests that long-term nutrient addition has a positive impact on small- and medium-sized soil arthropod communities by changing plant evenness and soil pH, and the contribution of soil pH is greater than that of plant evenness.

Keywords Nitrogen and phosphorus addition; meadow grassland; medium and small soil arthropod community; environmental factor

收稿日期 Received: 2021-07-10 接受日期 Accepted: 2021-09-26

国家自然科学基金项目(31170435)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170435)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: nmczhm1970@126.com)

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分^[1]。氮磷是草地系统的主要限制元素,氮磷输入直接或间接影响草地生态系统的植被、土壤生物群落结构及相关的生态过程^[2]。近年来,随着氮磷沉降加剧,其对草原生态系统的影响引起了人们的广泛关注。杜艺等针对氮添加对草地土壤化学性质影响的meta分析指出,氮输入后土壤养分的变化,改变了草地生态系统的净初级生产量及养分循环,使硝酸盐淋失增加,推动了土壤的酸化,而pH的效应值与土壤有机碳、硝态氮、铵态氮和可溶性有机氮的效应值之间有显著负相关^[3-5]。氮沉降的持续输入,使土壤自身的磷供应不足,难以满足生物生长的需求,从而使草地生态系统由氮限制向磷限制转变^[6-7]。磷限制通常发生在因长期使用而未及时补充磷资源的生态系统中,比氮限制为植物物种共存提供了更多的可能性,使生态系统具有更大的多样性^[8-9]。

土壤动物是生态系统中最丰富的物种之一,是生态系统功能的主要驱动因素,其群落结构组成及多样性对环境变化的响应敏感,可以作为指示环境变化的评价指标^[10-11]。Cecilia等的研究表明养分添加增加了凋落物生物量、提高了初级生产力以及改变了土壤理化性质^[12],植物和土壤通过不同的方式驱动着土壤动物群落变异^[13]。研究表明,氮素添加通过提高草地植物群落的生产力和植物叶片的氮含量^[14],促进了凋落物的分解与养分释放,增加了土壤动物的食物来源,改变了土壤动物的群落组成与结构。同时养分添加还通过改变土壤的理化性质,影响土壤动物的生存环境。Xu等通过meta分析发现,长期的氮素添加会引起土壤酸化^[15],而土壤动物大多生活在中性及微酸性环境中^[16],pH降低将会引起土壤动物群落结构与时空分布的变化。养分添加主要通过影响土壤动物的生存环境与食物来源间接作用于土壤动物,但是目前关于养分添加对土壤动物群落结构的影响,大多集中在氮素添加方面,而Vogels等指出中小型节肢动物更容易受到磷限制的影响^[17],所以,想要更好地了解养分添加对中小型土壤动物群落的影响,研究其对氮磷添加的响应不容忽视。

贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草原位于大兴安岭西麓,是草甸草原的主要代表类型之一,在我国的农牧业发展中发挥着重要的作用^[18]。近年来过度放牧导致草场生产力持续下降,而中小型土壤节肢动物作为地下物质循环的重要参与者,在促进养分循环和改善土壤肥力方面发挥着重要作用^[19]。因此,我们以贝加尔针茅草原为研究背景,通过连续9年养分添加,拟解决以下问题:(1)分析草甸草原中小型土壤节肢动物群落结构在长期氮磷输入下的变化规律;(2)探讨长期氮磷添加引起中小型土壤动物群落变化的主控因子。本研究旨在为贝加尔针茅草原的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古呼伦贝尔市伊敏河镇贝加尔针茅草原,地理位置为北纬48°27'-48°35',东经119°35'-119°41',海拔为760-770 m,地势平坦,于2010年6月围封,土壤类型为暗栗钙土,pH为7.07,有机质35.92 g/kg、全氮1.85 g/kg、全磷0.45 g/kg。气候属于大陆性温带气候,年均气温-1.6℃,年均降水量348.8 mm(图1),年蒸发量1 478.8 mm,降水主要集中在6-9月,年均无霜期为100 d左右。贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)为建群种,羊草(*Leymus chinensis*)为优势种,羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、日荫菅(*Carex*

pediformis)、落草(*Koeleria cristata*)、扁蓿豆(*Pocockia ruthenica*)、草地麻花头(*Serratula amatsutanna*)、蓬子菜(*Galium verum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和展枝唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等为常见伴生种。

1.2 试验设计

在贝加尔针茅草原选择地势平坦、植被具有代表性的地段围封并进行养分添加试验,施肥处理为施N素、P素和NP混合施入(其中N素为硝酸铵,P素为重过磷酸钙,施入量均为100 kg hm⁻² a⁻¹)以及不施肥处理CK,每个重复4次,随机区组排列。小区面积8 m × 8 m = 64 m²,各小区与重复区间分别设2 m和5 m隔离带。养分添加试验于2010年6月开始,每年添加两次,在牧草生长期6月和7月中旬进行,每次添加量为全年添加量的50%。施肥为均匀手撒,对照不做任何处理。

1.3 样品采集

按照贝加尔针茅草原植被返青期、生长期和枯黄期进行样品采集,2019年5月和8月中旬以及9月下旬采集。为避免边界效应,在每个试验小区中选取3个未被扰动的点,用环刀(体积200 cm³)自上而下进行取样。中小型土壤动物采用Tullgren干漏斗法进行48 h分离,将收集到的中小型土壤动物装在盛有75%的乙醇溶液瓶并贴上标签。在土壤动物采样的同时,采集0-20 cm土样进行土壤理化性质指标的分析。

植物群落于生长期进行调查。在不同小区随机选择1 m × 1 m样方,调查各样方内植物群落物种组成及高度、盖度、密度等指标。植被调查后用收获法将植物齐地面物种剪下后装入信封袋带回实验室称其鲜重,采用烘干法在105℃杀青30 min,继续于75℃恒温箱烘干24 h,烘干后称其干重并记录地上生物量。

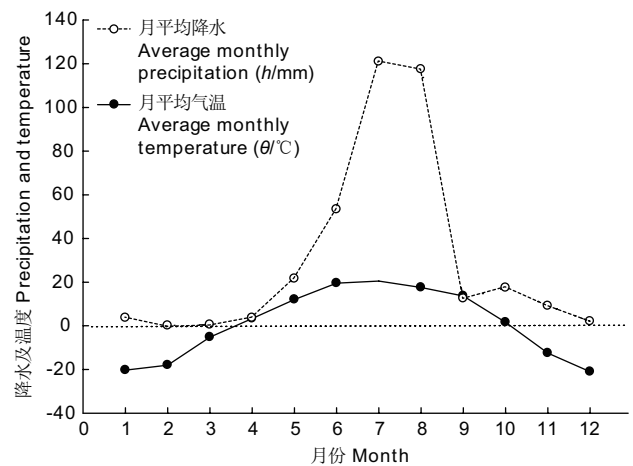


图1 试验区气象数据。

Fig. 1 Meteorological data of the study area.

1.4 测定方法

中小型土壤动物的分类参考尹文英等的《中国土壤动物检索图鉴》,并在显微镜(Olympus CKX41)和体视显微镜(SZ78系列)下对收集到的土壤动物标本进行鉴定,鉴定到科的水平。各类群等级划分为:个体数占总数10%以上的为优势类群;个体数占总数1%-10%之间的为常见类群;个体数占总数1%以下的为稀有类群^[20]。

土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法;土壤pH采用STARTER 2100型酸度计(土:液=1:5)测定;土壤含水量采用烘干称重法;土壤全氮采用凯氏定氮仪测定(K9840凯氏定

氮仪),速效磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法.速效钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法.

1.5 数据统计与分析

采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Simpson优势度指数(C)、Pielou均匀度指数(E)、Margalef丰富度指数(D)作为氮素添加下中小型土壤节肢动物群落及植被群落的特征指标,采用(头/ m^2)作为土壤中小型土壤节肢动物个体密度单位(深度为0-20 cm),采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较法(LSD)对不同处理进行差异显著性分析.采用非度量多维分析(NMDS)对中小型土壤动物优势类群及常见类群对养分添加的响应进行分析.采用冗余分析(RDA)对中小型土壤动物优势类群和常见类群个体数与环境之间进行相关性分析.数据分析处理与作图使用Excel 2003、SigmaPlot 12.5、方差分析使用SPSS 19.0,非度量多

维分析使用CANOCO 5.0进行.

$$(1) H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$(2) C = - \sum_{i=1}^S (n_i/N)^2$$

$$(3) E = H'/\ln S$$

$$(4) D = (S - 1)/\ln N$$

式中, S 为每一样方中的物种总数, P_i 为第*i*个物种的重要值, P_{ij} 是第*i*种在第*j*个取样中的个体密度百分率, S 为总种数或种的总量.

2 结果与分析

2.1 氮磷添加对土壤动物群落组成的影响

由表1可知,本研究中共捕获中小型土壤节肢动物15

表1 长期氮磷添加背景下土壤动物群落组成

Table 1 Composition of soil fauna community in the context of long-term nitrogen and phosphorus addition

群落组成 Community composition	贝加尔针茅草原养分添加 Nutrient addition of <i>Stipa baicalensis</i> grassland				总计 Total	比例 Proportion (P/%)
	CK	N	P	NP		
前气门亚目 Prostigmata						
微离螨科 Microdispidae		83.33			83.33	0.54
矮蒲螨科 Pygmephoridae	83.33	250		250	583.33	3.80
吸螨科 Bdellidae			83.33		83.33	0.54
肉食螨科 Cheylritidae	83.33	333.33	166.67	166.67	750	4.89
隐鄂螨科 Cryptognathidae		83.33	250		333.33	2.17
小黑螨科 Caligonellidae		83.33	166.67	416.67	666.67	4.35
异小黑螨科 Xenocaligonellidae		83.33			83.33	0.54
中气门目 Mesostigmata						
厉螨科 Laelapidae	166.67	250	166.67	333.33	916.67	5.98
美绥螨科 Ameroseiidae				83.33	83.33	0.54
巨螯螨科 Macrochelidae				83.33	83.33	0.54
寄螨科 Parasitidae			83.33	83.33	166.67	1.09
厚厉螨科 Pachylaelapidae	83.33	583.33	83.33	250	1000	6.52
植绥螨科 Phytoseiidae				83.33	83.33	0.54
虫穴螨科 Zerconidae				83.33	83.33	0.54
维螨科 Veigaiidae				83.33	83.33	0.54
囊螨科 Ascidae	83.33				83.33	0.54
甲螨亚目 Oribatida						
奥甲螨科 Oppiidae	83.33	83.33			166.67	1.09
步甲螨科 Carabodidae	166.67	166.67	83.33	166.67	583.33	3.80
若甲螨科 Oribatuloid	83.33				83.33	0.54
原蛸目 Poduromorpha						
疣蛸科 Neanueidae		83.33		83.33	166.67	1.09
棘蛸科 Onychiuridae		166.67			250	1.63
等节蛸科 Isotomidae		416.67	166.67		583.33	3.80
球角蛸科 Hypogastruridae	166.67	250	250	83.33	750	4.89
短角蛸目 Neelipleona						
短角蛸科 Neelidae		83.33			83.33	0.54
愈腹蛸目 Symphyleona						
圆蛸科 Sminthuridae		83.33		166.67	250	1.63
长角蛸目 Entomobryidae						
长角蛸科 Entomobryidae			83.33		83.33	0.54
蜚蠊目 Blattoptera						
木蠹科 Kalotermitidae	83.33				4553.32	0.54
啮目 Psocoptera						
虱啮科 Liposcelididae	583.33	1083.33	1583.33	1250	4500	29.35
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae						
夜蛾科 Noctuidae	166.67	250		416.67	833.33	5.43
双翅目幼虫 Diptera larvae						
长足蛇科幼虫 Dolichopodidae	83.33				83.33	0.54
缨翅目 Thysanoptera						
管蓟马科 Phloeothripidae	250	750	166.67	666.67	1833.33	11.96
个体数 Individuals	2166.67	5166.67	3333.33	4666.67	15333.33	
类群数 Group number	14	19	13	18	31	

333.33头,隶属于12目31个类群,优势物种为缨翅目的管蓟马科和啮目的虱啮科,分别占总捕获数的29.35%和11.96%。常见类群有15种,分别为前气门亚目的矮蒲螨科、肉食螨科、隐鄂螨科和小黑螨科,中气门目的厉螨科、寄螨科、厚厉螨科,甲螨亚目的奥甲螨科和步甲螨科,原蛸目的等节蛸科、球角蛸、棘蛸科、疣蛸科,愈腹蛸目圆蛸科及鳞翅目幼虫的夜蛾科,占总捕获数的47.28%,其中厉螨科和厚厉螨科在总捕获数的占比超过了5%。稀有类群有14种,占总捕获数的11.41%。

2.2 氮磷添加对土壤动物群落分布的影响及季节动态变化

养分添加改变了土壤中小型土壤动物的群落组成(图2)。土壤动物的个体数和类群数在N处理和NP处理下均显著高于对照CK ($P < 0.05$),个体数分别增加1.38倍和1.15倍,类群数分别增加28.57%和21.43%。P处理个体数和类群数高于对照但未达到显著水平。与CK相比,8月与9月N、P、NP处理均增加了土壤动物的个体数和类群数,其中8月份个体数和类群数出现最大值,且较CK而言3个处理均显著增加了土壤动物的个体数,其中N处理显著增加了土壤动物的类群数。N和NP处理下所捕获的土壤动物类群数和个体数均高于对照CK。

2.3 氮磷添加下中小型土壤动物多样性变化

由图3所示,在长期养分添加条件下,中小型土壤动物群落的多样性指数在N处理下显著高于CK ($P < 0.05$),优势度指数在P处理下显著高于CK ($P < 0.05$),NP处理多样性指数

与优势度指数均高于CK,但无显著差异。均匀度指数和丰富度指数在N、P和NP处理下均高于CK,但均未达到显著水平。总体来说,氮磷添加对中小型土壤动物的均匀度指数和丰富度指数影响较小,对多样性指数和优势度指数影响显著。

2.4 养分添加下环境因子的变化

2.4.1 养分添加下土壤因子的变化 如表2所示,长期氮磷添加对土壤的理化性质产生不同的影响。其中N、P和NP处理均降低了土壤pH值,且N和NP处理下pH下降达到显著水平 ($P < 0.05$);速效磷在P、NP处理较CK显著增加 ($P < 0.05$);土壤全氮、有机质、速效钾含量在养分添加下均无显著变化,含水量在N、P和NP处理下略有下降,但均未达到显著水平。

2.4.2 养分添加下植物因子的变化 贝加尔针茅草原植被受长期养分添加影响,总地上生物量与多样性发生显著变化(图4)。其中禾本科植物在N和NP处理下地上生物量显著增加 ($P < 0.05$),杂类草、豆科和菊科在养分添加的第9年地上生物量均出现了不同程度的降低,但均未达到显著水平;总地上生物量变化趋势与禾本科植物一致,均在N和NP添加处显著增加 ($P < 0.05$)。

与CK相比,植物的优势度指数与均匀度指数均在N、P和NP处理下显著降低,多样性指数与丰富度指数均在NP处显著降低 ($P < 0.05$)(图5)。总体来说,养分添加对植物丰富度指数与均匀度指数影响较小,对多样性指数与丰富度指数影响显著,且禾本科植物对氮磷添加的响应较为敏感。

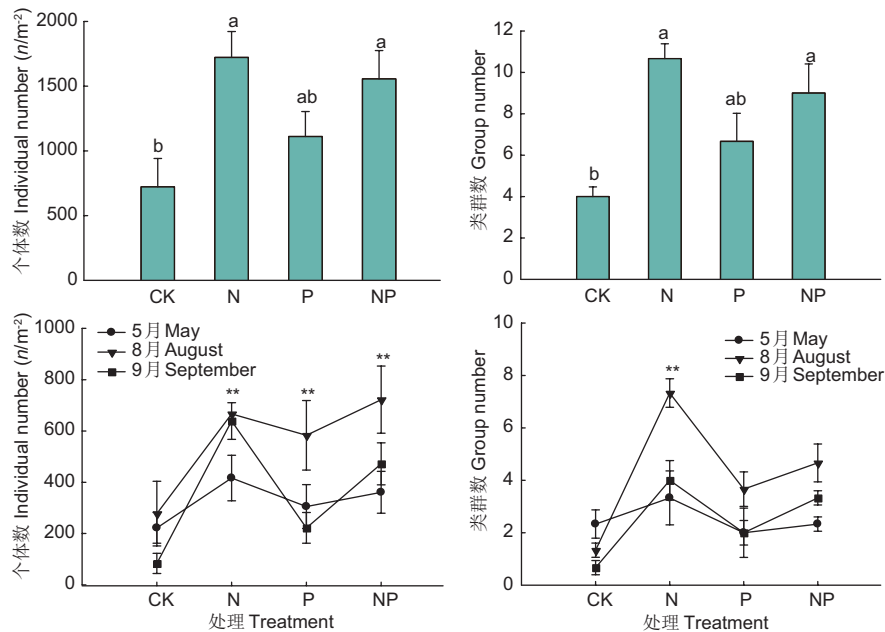


图2 长期氮磷添加下土壤动物群落分布和季节变化。不同小写字母和**表示各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。 Fig. 2 Distribution and seasonal changes of soil fauna communities with long-term addition of nitrogen and phosphorus. Different lowercase letters and ** indicate significant differences in the treatments ($P < 0.05$).

表2 土壤理化性质 Table 2 Physical and chemical properties of soil

处理 Treatment	pH	速效磷 Available phosphorus (w/mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (w/mg kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (w/g kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (w/g kg ⁻¹)	含水量 Soil moisture content (w/g kg ⁻¹)
CK	6.51 ± 0.02a	14.85 ± 0.23b	158.73 ± 14.81a	2.20 ± 0.66a	45.79 ± 1.00a	25 ± 0.12a
N	5.95 ± 0.17c	15.61 ± 2.97b	141.49 ± 8.31a	2.46 ± 0.57a	41.86 ± 2.66a	18 ± 0.02a
P	6.38 ± 0.45ab	98.71 ± 41.89a	191.03 ± 47.95a	1.32 ± 0.91a	42.76 ± 2.71a	17 ± 0.21a
NP	6.24 ± 0.45b	74.35 ± 17.25a	159.3 ± 19.26a	2.73 ± 0.66a	46.86 ± 7.70a	21 ± 0.42a

不同小写字母表示各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant differences between the treatments ($P < 0.05$).

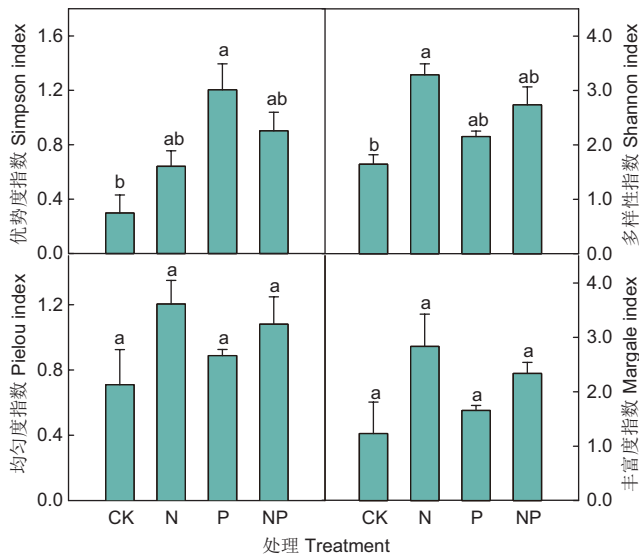


图3 长期氮磷添加下土壤动物群落多样性特征. 不同小写字母表示各处理有显著差异 ($P < 0.05$).

Fig. 3 Diversity characteristics of soil fauna community with long-term addition of nitrogen and phosphorus. Different lowercase letters indicate significant differences between the treatments ($P < 0.05$).

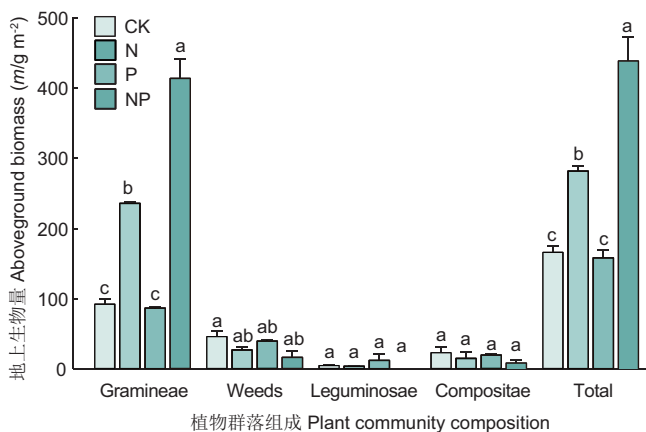


图4 长期氮磷添加下植物群落特征. Gramineae: 禾本科植物; Weeds: 杂草类; Leguminosae: 豆科; Compositae: 菊科; Total: 总地上生物量.

Fig. 4 Characteristics of plant community with long-term nitrogen and phosphorus addition.

2.5 养分添加下土壤动物与环境因子的相关关系

对长期养分添加背景下中小型土壤节肢动物的优势类群和常见类群进行非度量多维分析 (NMDS), 排序分析的平均胁迫系数 (stress) 为0.068 28 (图6a). 依据中小型土壤群落组成将养分添加处理分为3组, 3组间土壤动物群落组成具有明显差异, 其中P处理和对照CK各为1组, N和NP处理划分为1组, 表明N和NP处理下中小型土壤节肢动物群落分布较为聚集, 相似性较高.

中小型土壤节肢动物类群中优势种和常见种与环境因子进行的冗余分析 (RDA) 表明, 第一排序轴与第二排序轴的特征值分别为68.77%与6.78%, 排序轴1和排序轴2的累积贡献率为75.55%, 累计方差解释度达到了86.8%, 由此表明环境因子能够较好地解释土壤动物类群的变化 (图6b). pH和植物均匀度指数值对土壤动物类群变化的解释率分别为31.6%和28.0%, 且均达到显著水平 ($P < 0.05$), 可以认为是养分添加下驱动土壤动物群落变化的主要因素, 其中与pH呈正相关

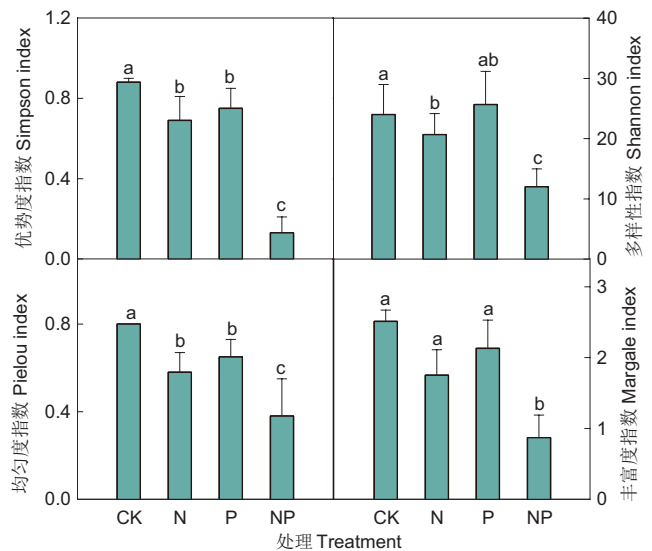


图5 长期氮磷添加下植物群落多样性特征. 不同小写字母表示各处理有显著差异 ($P < 0.05$).

Fig. 5 Diversity characteristics of plant community with long-term nitrogen and phosphorus addition. Different lowercase letters indicate significant differences between the treatments ($P < 0.05$).

性的土壤动物类群有隐鄂螨科, 呈负相关的有矮蒲螨科、肉食螨科、小黑螨科、奥甲螨科、等节蛱科、圆蛱科、棘蛱科、管蓟马科; 与植物均匀度 (P1) 呈正相关的有隐鄂螨科、奥甲螨科, 呈负相关的有矮蒲螨科、肉食螨科、小黑螨科、寄蛱科、厚厉蛱科、等节蛱科、圆蛱科、棘蛱科、夜蛾科、管蓟马科. 其他环境因子对土壤动物群落变化产生不同的影响, 但均未达到显著水平 ($P > 0.05$) (表3).

3 讨论

3.1 长期氮磷添加对中小型土壤动物群落结构的影响

土壤动物作为地下生态系统的重要组成部分, 与土壤微生物等共同构成土壤微食物网, 其对环境响应敏感, 可作为指示环境变化的生物指标. 长期养分添加改变了中小型土壤动物的群落结构, 我们发现在氮添加处理 (N和NP处理) 下, 中小型土壤动物的个体数与类群数均较CK显著增加, 可能是因为土壤动物主要以植物和微生物为食^[21], 适量的养分输入, 提高了植物的地上生物量及微生物数量, 改善了中小型土壤动物的食物来源^[22], 这与Cole等在温带草地上的模拟试验结果一致, 即适量的氮素添加对中小型土壤动物起着积极作用^[23]. 贝加尔针茅草原属于氮限制的生态系统, 而磷限制通常出现在氮限制之后^[24], 本研究中磷处理下中小型土壤动物的个体数和类群数均较CK有所增加, 但未达到显著水平. 原因可能是长期的养分添加并未使贝加尔针茅草原由氮限制转到磷限制, 所以磷素进入土壤后对土壤动物的影响仍受到氮含量的制约, 而蔡岸东等人在草地上养分添加的研究发现, 磷添加促进了植物与凋落物中氮的积累, 降低凋落物的质量^[25], 使其更容易被分解者分解, 进而促进了地表养分归还, 改善了土壤结构和有机环境, 为土壤动物的生存发展提供了良好的营养条件. 中小型土壤节肢动物个体数与类群数在NP处理下高于CK, 且低于N处理, 可能是因为氮的输入, 解除了氮限制下的磷饱和, 提高了磷的有效性, 填补了土壤中的养分短板, 从而促进了中小型土壤动物群落的发展, 此结果符合最小因子定律^[26].

通过中小型土壤动物多样性特征变化发现, 土壤动物的

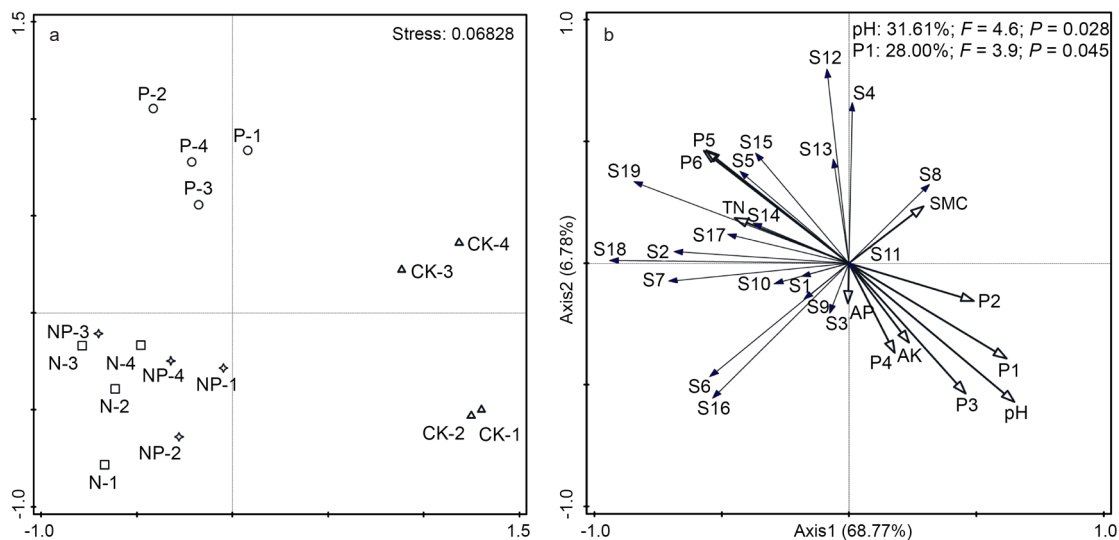


图6 长期氮素添加下中小型土壤节肢动物和解释环境变量的非度量多维分析(a)及冗余分析(b)。TN: 全氮; AP: 速效磷; AK: 速效钾; SMC: 含水量。P1: 植物均匀度指数; P2: 植物优势度指数; P3: 豆科植物生物量; P4: 菊科植物生物量; P5: 总地上生物量; P6: 禾本科植物生物量。S1: 矮蒲螨科; S2: 肉食螨科; S3: 隐鄂螨科; S4: 小黑螨科; S5: 厉螨科; S6: 寄螨科; S7: 厚厉螨科; S8: 奥甲螨科; S9: 步甲螨科; S10: 等节螨科; S11: 球角螨科; S12: 圆螨科; S13: 棘螨科; S14: 疣螨科; S15: 夜蛾科; S16: 虱啮科; S17: 管蓟马科; S18: 个体数; S19: 类群数。

Fig. 6 Long-term nitrogen addition to small and medium-sized soil arthropods and non-metric multidimensional analysis (a) and redundant analysis (b) of explaining environmental variables. TN: Total nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; SMC: Soil moisture content. P1: Plant Pielou index; P2: Plant Simpson index; P3: Leguminosae biomass; P4: Compositae biomass; P5: Aboveground biomass; P6: Gramineae biomass. S1: Pygmephorida; S2: Cheylrtidae; S3: Cryptognathidae; S4: Caligonellidae; S5: Laelapidae; S6: Parasitidae; S7: Pachylaelapidae; S8: Opplidae; S9: Carabodidae; S10: Isotomidae; S11: Hypogastruridae; S12: Sminthuridae; S13: Onychiuridae; S14: Neaneuidae; S15: Noctuidae; S16: Liposcelididae; S17: Phloeothripidae; S18: Individual; S19: Group.

表3 冗余分析(RDA)各土壤环境因子对土壤动物群落变异的解释度		Table 3 Explanatory degree of soil faunas community variation by various soil environmental factors using redundancy analysis			
环境因子 Environmental factor	解释率 Explains (P/%)	伪F值 Pseudo-F	P值 P value		
pH值 pH value	31.6	4.6	0.028		
均匀度指数 Pielou index (P1)	28.0	3.9	0.045		
禾本科生物量 Gramineae biomass (P6)	24.3	3.2	0.104		
总地上生物量 Aboveground biomass (P5)	23.5	3.1	0.086		
优势度指数 Simpson index (P2)	17.4	2.1	0.170		
菊科生物量 Compositae biomass (P4)	17.2	2.1	0.124		
全氮 Total nitrogen (TN)	15.2	1.8	0.200		
土壤含水量 Soil moisture content (SMC)	7.0	0.8	0.464		
速效钾 Available potassium (AK)	5.5	0.6	0.536		
豆科生物量 Leguminosae biomass (P3)	4.2	0.4	0.680		
速效磷 Available Phosphorus (AP)	1.5	0.2	0.916		

优势度指数在P处理下显著升高,这说明土壤动物中某个类群在磷处理下占比较高^[27],可能因为连续的磷添加增加了分解微生物残体酶的活性,增强了微生物残体的循环^[28],使得某种腐食性土壤动物个体数量增加,进而改变了中小型土壤动物群落组成。土壤动物的多样性指数在N处理较CK显著增加,可能因为氮添加刺激微生物活性^[29],促进了凋落物分解,使土壤碳输入增加,进而为更多的土壤动物类群提供足够的碳补给,降低了土壤动物的种间和种内竞争,这与叶贺等人在荒漠草原上水氮添加的结果^[30]较为一致。且长期氮磷添加的结果指出,植被生长期(8月)为贝加尔针茅草原中小型土壤动物的最适生长期,原因在于8月份良好的水热条件,加快了地下生态系统的周转,促进了根系生长,从而在增加中小型土壤动物食物来源的基础上,加大土壤孔隙,疏松土壤表层^[31-32],为中小型土壤动物的生存和繁殖提供了充足的营养物质和良好的有氧环境。

3.2 长期氮磷添加下中小型土壤动物多样性对环境因子变化的响应

贝加尔针茅草甸草原属于氮限制陆地生态系统,对养分输

入响应敏感,长期养分添加通过植被群落和土壤理化影响地下生态系统的流动与周转,从而对中小型土壤动物群落产生影响。通过中小型土壤动物优势类群和常见类群分布特点的非度量多维分析(NMDS)可将养分添加及对照处理有效地划分为3组,N和NP处理为1组,P和CK处理各为1组,根据分组情况可知,在N处理和P处理捕获的土壤动物类群在分布上具有一定的差异,但和NP处理下的土壤动物类群分布较为一致,这就更有力地说明了此牧场目前仍处于氮限制之中,其对氮的耐受阈值还需要进一步探索。养分添加通过影响草地环境因子来间接影响土壤动物的群落组成。本研究中,长期的养分添加显著降低了土壤的pH值,可能因为研究样地的长期围封,使大量凋落物归还地表,有机碳增加,腐殖酸不断积累,导致土壤pH有所下降^[33];此外长期养分添加,致使土壤硝化作用增强,铵态氮在硝化细菌的作用下转化为硝态氮,释放出H⁺,进而使pH值持续下降^[34]。通过冗余分析(RDA)发现,pH和植物均匀度指数是驱使中小型土壤动物群落变化的主要环境因素。长期的养分添加下pH值降低,使土壤呈微酸性,Jilling等人的研究

结果表明酸化环境下,可释放与矿物结合的有机碳来增加微生物获取矿物有机碳的能力,这一过程在根际附近体现更为明显,由于根际分泌物中含有草酸等大量小分子有机酸,一方面根系分泌物可提高土壤氧化酶的活性来增强分解有机碳能力,另一方面氢离子的增加通过解析在矿物表面吸附的碱金属离子(钙、镁等)来降低有机碳在矿物表面的稳定性,从而引起有机碳的加速分解,增加了土壤动物的营养供给^[35-36];此外,中小型土壤动物喜欢在中性或微酸性环境中生存,这与Noyce等人旱地草地系统开展的氮施肥试验研究结果^[37]一致。本研究中值得注意的是,长期的氮磷输入并未改变土壤中全氮的含量,可能是因为长期氮磷输入增加了地上生物量,植物带走了大部分的氮素,而凋落物中的氮素没有及时归还到土壤中^[37],从而呈现出一种供求平衡的状态。总体来说,长期的养分添加通过改变植物与土壤理化对中小型土壤节肢动物群落产生影响,且土壤理化的作用效果大于植物变化。

4 结论

长期养分输入对草地生态系统稳定产生影响,养分通过改变土壤动物食物来源和生存环境影响着中小型土壤节肢动物群落分布,本研究结果表明,(1)长期养分输入对中小型土壤节肢动物群落的发展具有积极影响;(2)草地植被生长期(8月)为中小型土壤节肢动物的最适生长繁殖期;(3)养分添加通过增加禾本科植物生物量,降低土壤pH和植物均匀度,影响土壤动物群落的生存与繁殖,其中土壤pH是影响土壤动物群落变化的主控因子。由于本研究只讨论了氮磷输入下植物和土壤理化等非生物因素对土壤动物群落的影响,缺乏生物因素对土壤动物群落变化的探讨,后期的研究可通过微生物、酶等的测定分析土壤动物群落组成多样性及营养级结构,建立结构方程模型,找到长期养分添加下中小型节肢动物的调控机制。

参考文献 [References]

- 赵晓琛,刘红梅,皇甫超河,王慧,白龙,王彩灵,杨殿林.贝加尔针茅草原土壤微生物功能多样性对养分添加的响应[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1933-1939 [Zhao XC, Liu HM, Huangpu CH, Wang H, Bai L, Wang CL, Yang DL. Responses of functional diversity of soil microbial communities to nutrient additions in *Stipa baicalensis* steppe in Inner Mongolia, China [J]. *J Agric Environ Sci*, 2014, 33 (10): 1933-1939]
- Jalali M, Goharpour M, Moharami S. Contrasting effects of four plant residues on phosphorus sorption-desorption in Some phosphorus fertilized calcareous soils [J]. *Commun Soil Sci Plan*, 2018, 49 (9): 1022-1031
- 岳泽伟,李向义,李磊,林丽莎,刘波,曾凡江.氮添加对昆仑山高山草地土壤、微生物和植物生态化学计量特征的影响[J].生态科学,2020,39(3):1-8 [Yue ZW, Li XY, Li L, Lin LS, Liu B, Zeng FJ. Responses of soil, microbes and plant ecological stoichiometric characteristics to nitrogen addition in an alpine grassland of Kunlun Mountain [J]. *Ecol Sci*, 2020, 39 (3): 1-8]
- 顾梦娜,潘月鹏,宋琳琳,李萍,田世丽,武岳阳,杨婷婷,李浩洋,石生伟,吐莉尼莎,吕雪梅,孙倩,方运霆.2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测[J].环境科学,2021,42(1):1-8 [Gu MN, Pan YP, Song LL, Li P, Tian SL, Wu YY, Yang TT, Li HY, Shi SW, Tu LNS, Lv XM, Sun Q, Fang YT. Concurrent collection of ammonia gas and aerosol ammonium in urban Beijing during national celebration days utilizing an acid-coated honeycomb denuder in combination with a filter system [J]. *Environ Sci*, 2021, 42 (1): 1-8]
- 杜艺,翟鹏辉,贾镇宁,王一昊,王子量,赵祥.天然草地土壤化学性质对氮磷添加响应的Meta分析[J].草原与草坪,2021,41(1):76-82 [Du Y, Zhai PH, Jia Z N, Wang YH, Wang ZL, Zhao X. Meta analysis of the response of natural grassland soil chemical properties to nitrogen and phosphorus addition [J]. *Grassland Turf*, 2021, 41 (1): 76-82]
- 王传杰,王齐齐,徐虎,高洪军,朱平,徐明岗,张文菊.长期施肥下农田土壤一有机质一微生物的碳氮磷化学计量学特征[J].生态学报,2018,38(11):3848-3858 [Wang CJ, Wang QQ, Xu H, Gao HJ, Zhu P, Xu MG, Zhang WJ. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38 (11): 3848-3858]
- 陈美领,陈浩,毛庆功,朱晓敏,莫江明等.氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J].生态学报,2016,36(16):4965-4976 [Chen ML, Chen H, Mao QG, Zhu XM, Mo JM. Effect of nitrogen deposition on the soil phosphorus cycle in forest ecosystems: a review [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36 (16): 4965-4976]
- Meghan LA, Sally EK, Kimberly JLP, Kevin RW, Gail WTW, Melinda DS, Scott LC. Changes in plant community composition, not diversity, during a decade of nitrogen and phosphorus additions drive aboveground productivity in a tall grass prairie [J]. *J Ecol*, 2014, 102 (6): 1649-1660
- Willen K, Steven AB, Marian B. Nitrogen, phosphorus and potassium budgets for two small fens surrounded by heavily fertilized pastures [J]. *J Ecol*, 1990, 78 (2): 428-442
- Wardel DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Heikki S, Vim H, Wall DH. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1629-1633
- Bardgett RD, Chan KF. Experimental evidence that soil fauna enhance nutrient mineralization and plant nutrient uptake in montane grassland ecosystems [J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31 (7): 1007-1014
- Cecilia D, Carly JS, Traure R, Albert B, Cord PL, David JGG, Nancy BD, Edu D, Roland B, Martin D. Changes in species richness and composition in European acidic grasslands over the past 70 years: the contribution of cumulative atmospheric nitrogen deposition [J]. *Glob Chang Biol*, 2010, 16 (1): 334-356
- Haddad NM, Haarstad J, Tilman D. The effects of long-term nitrogen loading on grassland insect communities [J]. *Oecologia*, 2000, 124 (1): 73-84
- Eastman BA, Adams MB, Brzostek ER, Burnham MB, Carrara JE, Kelly CMBE, Walter CA, Peterjohn WT. Altered plant carbon partitioning enhanced forest ecosystem carbon storage after 25 years of nitrogen additions [J]. *N Phytol*, 2021, 230 (4): 1435-1448
- Xu CH, Xu X, Ju CH, Chen HYH, Brian JW, Luo Q, Fan W. Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide [J]. *Glob Chang Biol*, 2021, 27 (6): 1170-1180

- 16 Murray PJ, Cook R, Currie AF, Dawson LA, Gange AC, Garyston JS, Treonis AM. Interactions between fertilizer addition, plants and the soil environment: implications for soil faunal structure and diversity [J]. *Appl Soil Ecol*, 2005, **33** (2): 199-207
- 17 Vogels JJ, Verberk WCEP, Lamers LPML, Siepel H. Can changes in soil biochemistry and plant stoichiometry explain loss of fauna diversity of heathlands [J]. *Biol Conserv*, 2016, **212** (5): 432-447
- 18 王文东, 红梅, 赵巴音那木拉, 刘鹏飞, 赵乌音嘎, 马尚飞, 美丽. 不同培肥措施对黑土区农田中小型土壤动物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (6): 1344-1351 [Wang WD, Hong M, Zhao BYNML, Liu PF, Zhao WYG, Ma SF, Mei L. Effects of different fertility-building practices on the meso-micro soil fauna communities in a black soil area China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (6): 1344-1351]
- 19 严珺, 吴纪华. 植物多样性对土壤动物影响的研究进展[J]. 土壤, 2018, **50** (2): 231-238 [Yan J, Wu JH. Study advances in plant diversity effects on soil fauna [J]. *Soils*, 2018, **50** (2): 231-238]
- 20 马尚飞, 红梅, 赵巴音那木拉, 赵乌音嘎, 王文东, 卢俊艳, 杨殿林. 模拟氮沉降对草甸草原中小型土壤节肢动物群落的影响[J]. 土壤, 2021, **53** (4): 755-763 [Ma SF, Hong M, Zhao BYNML, Zhao WYG, Wang WD, Lu JY, Yang DL. Effects of simulated nitrogen deposition on meso-micro soil fauna communities in meadow steppe [J]. *Soils*, 2021, **53** (4): 755-763]
- 21 李媛媛, 廖家辉, 许子乾, 徐涵涓, 倪娟平, 黄石德, 阮宏华. 有机肥和植被去除管理对人工林土壤节肢动物多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, **41** (7): 2761-2769 [Li YY, Liao JH, Xu ZQ, Xu HM, Ni JP, Huang SD, Ruan HH. Effects of organic fertilizer application and understory plant removal on the diversity of soil arthropods in poplar plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41** (7): 2761-2769]
- 22 徐福利, 梁银丽, 张成娥, 杜社妮, 陈志杰. 施肥对日光温室黄瓜生长和土壤生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (7): 1227-1230 [Xu FL, Liang YL, Zhang CE, Du SN, Chen ZJ. Effect of fertilization on cucumber growth and soil biological characteristics in sunlight greenhouse [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (7): 1227-1230]
- 23 Cole L, Buckland SM, Bardgett RD. Relating microarthropod community structure and diversity to soil fertility manipulations in temperate grassland [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37** (9): 1707-1717
- 24 Ren JZ, Hu ZZ, Zhao J, Zhang DG, Hou FJ, Lin HL, Mu XD. A grassland classification system and its application in China [J]. *Rangeland J*, 2008, **30** (2): 119-209
- 25 蔡岸冬. 我国典型陆地生态系统凋落物腐解的时空特征及驱动因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019 [Cai AD. Spatiotemporal patterns of litter decomposition and its driving factors across typical terrestrial ecosystem of China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019]
- 26 Li XC, Huang YY, Chen XQ, Bengt S, Wu Z. Breakup dynamics of gas-liquid interface during Taylor bubble formation in a microchannel flow-focusing device [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 2020, **26** (1): 113-125
- 27 殷秀琴, 安静超, 陶岩, 幸未冬, 蒋云峰, 王富斌等. 拉萨河流域健康湿地与退化湿地大型土壤动物群落比较研究[J]. 资源科学, 2010, **32** (9): 1643-1649 [Yin XQ, An JC, Tao Y, Xin WD, Jiang YF, Wang FB. Community changes of soil macro fauna in native and degenerative wetlands of the Lhasa River [J]. *Resour Sci*, 2010, **32** (9): 1643-1649]
- 28 Li JH, Zhang R, Cheng BH, Ye LF, Li WJ, Shi XM. Effects of nitrogen and phosphorus additions on decomposition and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Tibetan Plateau [J]. *Land Degrad Dev*, 2020, **32** (3): 1467-1477
- 29 张炜, 董文渊, 钟欢, 李吉, 柳治伦, 吴义远, 浦焱. 不同混交类型对箬竹生长及土壤养分空间差异的影响[J]. 西部林业科学, 2020, **49** (6): 70-75+84 [Zhang W, Dong WY, Zhong H, Li J, Liu ZL, Wu YY, Pu C. Effects of different mixed types on the growth of *Qiongzhusua tumidinoda* and spatial differences of Soil Nutrients [J]. *J W China For Sci*, 2020, **49** (6): 70-75+84]
- 30 叶贺, 红梅, 赵巴音那木拉, 霍利霞, 高海燕. 水氮控制对荒漠草原中小型土壤动物的影响[J]. 中国环境科学, 2018, **38** (11): 4325-4333 [Ye H, Hong M, Zhao BYNML, Huo LX, Gao HY. Effects of water and nitrogen control on soil meso- and micro-fauna communities in desert steppe [J]. *China Environ Sci*, 2018, **38** (11): 4325-4333]
- 31 Vreeken-Buijs MJ, Hassink J, Brussaard L. Relationships of soil microarthropod biomass with organic matter and pore size distribution in soils under different land use [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30** (1): 97-106
- 32 Lu HH, Wu WX, Chen YX, Wang H, Medha D, Janice ET. Soil microbial community responses to Bt transgenic rice residue decomposition in a paddy field [J]. *J Soils Sediments*, 2010, **10** (8): 1598-1605
- 33 Scheuerell SJ, Mahaffee WF. Compost tea as a contaminant medium drench for suppressing seedling damping-off caused by *Pythium ultimum* [J]. *Phytopathology*, 2004, **94** (11): 1156-1163
- 34 徐昇, 李欣, 钟萍, 刘正文. 苦草根系对硝氮和氨氮的吸收[J]. 生态科学, 2012, **31** (3): 312-317 [Xu S, Li X, Zhong P, Liu ZW. The uptake of nitrate and ammonium by the root of *Vallisneria spiralis* [J]. *Ecol Sci*, 2012, **31** (3): 312-317]
- 35 刘红梅, 张爱林, 皇甫超河, 李洁, 王慧, 杨殿林. 氮沉降增加对贝加尔针茅草原土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态环境学报, 2017, **26** (7): 1100-1106 [Liu HM, Zhang AL, Huangfu CH, Li J, Wang H, Yang DL. Effects of increasing nitrogen deposition on soil microbial community structure of *Stipa baicalensis* steppe in Inner Mongolia, China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2017, **26** (7): 1100-1106]
- 36 Jilling A, Keiluweit M, Gutknecht J, Grandy AS. Priming mechanisms providing plants and microbes access to mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biol Biochem*, 2021, **158**: 108265
- 37 Noyce GL, Kirwan ML, Rich RL, Megonigal JP. Asynchronous nitrogen supply and demand produce nonlinear plant allocation responses to warming and elevated CO₂ [J]. *PNAS*, 2019, **116** (43): 21623-21628