

DOI: 10.5846/stxb202012123164

薛娟, 王长庭, 曾璐, 魏雪, 吴鹏飞. 长期施加 N、P 肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落的影响. 生态学报, 2021, 41(23): 9432-9447.

Xue J, Wang C T, Zeng L, Wei X, Wu P F. Effects of long-term N and P additions on the soil microarthropod communities in alpine meadows. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9432-9447.

长期施加 N、P 肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落的影响

薛娟, 王长庭, 曾璐, 魏雪, 吴鹏飞*

西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

摘要: 为查明长期施肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落影响, 2012 年 5 月下旬在西南民族大学青藏高原畜牧业高科技研究基地内用随机区组方式设置施 N、P 和 NP 混施三种处理实验样地, 每种施肥处理分别设置 10 g/m²、20 g/m² 和 30 g/m² 三个施肥梯度, 以不施肥的高寒草甸为对照样地。2017 年 8 月对各样地内的小型土壤节肢动物、植物群落和土壤理化性质进行调查。结果表明: (1) 施肥可以明显改变高寒草甸小型土壤节肢动物的群落组成结构, 其中 NP 混施比单施 N、P 肥更能有效增加螨类和昆虫的类群数; (2) N、P、NP 三种施肥种类的小型土壤节肢动物群落个体密度、类群数和 Shannon 多样性指数均显著增加 ($P < 0.05$), 且当施肥量为 20 g/m² 时, 小型土壤节肢动物群落的个体密度、类群数和 Shannon 多样性指数均达到最大; (3) 小型土壤节肢动物群落的个体密度、类群数和 Shannon 多样性指数均与全磷含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。研究表明, 在高寒草甸长期施加氮、磷肥, 尤其是氮磷混施, 不仅能够明显改变小型土壤节肢动物群落组成结构, 还能显著提高群落密度和多样性, 建议按照 20 g/m² 的总量对高寒草甸进行氮磷等量混施, 以提高小型土壤节肢动物群落多样性及其生态功能。

关键词: 高寒草甸; 施肥; 小型土壤节肢动物; 群落多样性

Effects of long-term N and P additions on the soil microarthropod communities in alpine meadows

XUE Juan, WANG Changting, ZENG Lu, WEI Xue, WU Pengfei*

Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

Abstract: The objective of this study was to examine the effects of long-term N and P addition on soil microarthropod communities in alpine meadows. Three addition treatments of N fertilizer (N), P fertilizer (P) and a NP mixed fertilizer (NP) were set up in Hongyuan County, northwest Sichuan, in late May 2012. Each treatment included three fertilization gradients of 10 g/m² (N₁₀, P₁₀ and NP₁₀), 20 g/m² (N₂₀, P₂₀ and NP₂₀), and 30 g/m² (N₃₀, P₃₀ and NP₃₀) with six replication plots in size of 3 m × 3 m. Another six plots of alpine meadow without N and P addition were used as control treatments (CK). Investigations were conducted on the soil microarthropods and environmental factors in each plot in August 2017. Soil microarthropods were extracted from the soil samples for 48 h at 38 °C using the Tullgren method in the laboratory. The results showed that (1) the taxonomic composition structure of soil microarthropod communities was markedly influenced by N, P and NP additions, and the taxonomic richness of mites and insects were increased more significantly by NP mixed additions than N or P addition. (2) The individual density, taxonomic richness and Shannon diversity index of soil microarthropod communities increased significantly in the treatments of N, P and NP additions ($P < 0.05$), and reached to maximum values at the fertilization gradient of 20 g/m². (3) The individual density, taxonomic richness and Shannon diversity index significantly and positively correlated with soil total P ($P < 0.05$). The results

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971064, U20A2008); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0302); 四川省应用基础研究计划重点项目 (2018JY0556); 中央高校基本科研业务费专项 (2020NZD05)

收稿日期: 2020-12-12; 网络出版日期: 2021-07-25

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

demonstrated that additions of N, P, especially NP, changed the taxonomic composition structure, and increased the individual density and diversity of soil microarthropod communities in alpine meadows on Qinghai-Tibet Plateau. We recommended to add the N and P equal mixed fertilizer to alpine meadows at total amount of 20 g/m², to promote the soil microarthropod diversity and ecological functions.

Key Words: alpine meadow; fertilization; soil microarthropods; community diversity

青藏高原高寒草甸面积约为 1.33×10^6 km², 占中国草原面积的 30%^[1], 是我国重要牧区之一, 支撑着高原畜牧业的发展。高寒草甸也是世界上海拔最高、面积最大、类型最为独特的草地生态系统, 在涵养水源、保持水土、调节气候方面发挥着重要的生态作用^[2]。但近年来, 随着气候变化、过度放牧、人口增长和鼠类破坏^[3]等因素使高寒草甸严重退化甚至沙化、土壤肥力下降^[4]、草畜矛盾明显^[5], 从而严重限制青藏高原畜牧业的发展。有研究表明, 施肥是补充土壤养分、增加可食牧草产量、缓解草地退化的重要方法^[6]。在对退化天然草地改良的各单项技术中, 施肥是效果最好的改良措施^[7]。

土壤动物作为消费者和分解者, 是草地生态系统的重要组成成分, 对草地生态系统的物质循环和能量流动起着重要的调控作用^[8]。此外, 土壤动物对环境变化敏感^[9], 能够作为土壤质量评价的指标^[10], 反映生态系统的健康状况^[11]。已有研究表明, 在高寒草甸, 施用氮磷肥不仅能改变土壤物理化学性质^[12]; 还能影响土壤微生物多样性^[13]和植物群落结构、地上地下生物量^[14-15]。而已有的研究表明土壤理化性质^[16]、土壤微生物群落^[17]、植物群落^[18]的变化均可影响小型土壤动物群落组成。因此, 施肥必然会影响到小型土壤节肢动物群落。虽有研究报道了土壤动物群落多样性与不同施肥处理间的关系^[19-21], 但未见关于青藏高原高寒草甸生态系统中的施肥种类及梯度对小型土壤节肢动物的影响等方面的报道。相对于其他生态系统, 高寒草甸生态系统在气候类型^[22]、植物群落^[5], 尤其是土壤动物群落组成等方面都具有独特性^[1]。因此, 青藏高原高寒草甸土壤动物对施肥的响应也可能与其他生态系统不同, 因此有必要研究施肥对高寒草甸小型土壤节肢动物的影响。

本文研究青藏高原高寒草甸不同施肥种类和施肥梯度条件下小型土壤节肢动物群落组成及多样性演变规律, 旨在为高寒草甸土壤动物多样性维持和生态服务功能提升提供科学依据, 促进高寒草甸生态系统的科学管理和畜牧业可持续发展。

1 研究区概况

研究区位于四川省红原县西南民族大学生态保护与畜牧业高科技研发基地 (32°49.823' N, 102°35.237' E), 海拔 3494 m。该区属于大陆性高原寒温带半湿润季风气候, 日温差大, 霜冻期长, 四季变化不明显, 年平均气温 1.1℃, 最热月为 7 月, 平均温度 10.9℃, 最冷月为 1 月, 平均温度 -10.3℃; 干湿季节分明, 年降水量 650—800 mm, 主要集中在 5—9 月; 日照时间长, 太阳辐射强, 年日照时间 2417.9 h, 年平均相对湿度 71%。草甸类型是矮嵩草草甸, 植被盖度 80% 以上。主要类群有禾本科、莎草科、豆科以及杂类草。该区土壤类型是亚高山草甸土, 其土层深度达 40 cm 以上。

2 实验方法

2.1 施肥方案设置

2012 年 5 月下旬在研究区选择地势平坦、植被分布均匀的面积 100 m×100 m 的未退化的矮嵩草草甸作为研究样地, 在四周用围栏进行隔离保护。已有研究表明, 在维持高寒草甸牧草营养品质和最佳产量的前提下, N 肥的施肥量范围为 30—45 g/m², P 肥的施肥范围为 15—22.5 g/m²^[23]。此外, 还有研究表明在高寒草甸中 N、P 的总添加量不应超过 60 g/m²^[24]。参照已有施肥研究, 我们设计了以下施肥方案: 单施氮肥 (N)、单施磷肥 (P) 和氮磷肥混施 (NP) 三种处理; 每种处理的施肥量分别控制为 10 g/m² (N₁₀、P₁₀、NP₁₀)、20 g/m²

(N_{20} 、 P_{20} 、 NP_{20})和 30 g/m^2 (N_{30} 、 P_{30} 、 NP_{30})三种梯度,其中氮磷肥混施在施肥量不变的情况下每个施肥梯度样方大小 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$,6次重复。另设置6个不施肥的高寒草甸样方 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 作为对照(CK)。共设置了60个 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的样方,每个样方的四个角用木桩进行固定标记,样方间距为2 m,并以随机区组方式排列。施用的N肥为含N量46%的尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$,P肥为含 P_2O_5 量16%的过磷酸钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O}$ 。每年5月份植物生长初期的雨后,将肥料均匀施撒样方中。

2.2 土壤动物采集与鉴定

2017年8月,在每个样方内按照对角线法则随机选取3个点,用土钻按0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm层采集土样,同层3个点的土样混合后装入自封袋内,并做相应的标记,以备室内分离。

在实验室内,用干漏斗法(Tullgren法)分离土壤动物,上层空气温度控制在 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,分离时间为48 h。根据《中国土壤动物检索图鉴》^[25]、《昆虫分类检索》^[26]、《农业螨类学》^[27]等参考书籍,在体视显微镜(Olympus SZX16)和光学显微镜(Olympus BX53)下对收集到的土壤动物进行鉴定。一般鉴定到属,少数类群鉴定到科,并统计个体数量。

2.3 植物群落和土壤理化性质调查

2017年8月,在每个种植小区内选取 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 小样方进行植物群落的盖度调查。用收获法采集地上植物,并用手收取样方内的枯枝落叶,所有植物样品在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干至恒重,称取地上生物量。

在每个 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的样方内采集1份0—15 cm混合土样,用于分析土壤化学性质。土壤pH值采用电位法测定;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法;土壤全氮采用硫酸钾-硫酸铜-硒粉消煮,定氮仪自动分析法^[28]。

2.4 数据分析处理

多度划分: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。

群落排序分析:采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)对不同施肥种类和施肥梯度间土壤动物群落进行排序。在做PCA之前,先利用 $\log(x+1)$ 对数据进行转换。

群落多样性:用类群数代表丰富度指数;此外,计算土壤动物群落的 Shannon 多样性指数 $H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 和 Pielou 优势度指数 $E = H/\ln S$ 。式中, S 代表总类群数, P_i 为每个生境中第*i*个类群的个体密度占该生境中小型土壤动物总数的比例。

统计分析:利用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验不同施肥种类、施肥梯度及其交互作用对土壤动物的个体密度及多样性指数影响的差异显著性。分析前,先对个体密度、类群数、Shannon 多样性指数等指数进行 $\log(x+1)$ 转换,以降低数据的非正态性。对转换后仍不符合正态分布的数据改用非参数检验。获得显著性后,采用LSD法或Duncan法进行多重比较。

土壤动物与环境因子的关系:用降趋对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)对样方及小型土壤节肢动物群落进行排序。由于第1、2排序轴长度均大于4,因此选用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)对不同施肥种类、梯度下小型土壤节肢动物群落组成与环境因子的关系进行排序。此外,采用多元回归分析土壤环境与土壤动物密度、多样性的关系。

数据分析处理分别采用IBM SPSS 20.0和Canoco for windows 5.0软件进行完成。

3 结果和分析

3.1 小型土壤节肢动物群落组成

共分离到小型土壤节肢动物2295只,隶属于3纲21目91科141属(表1)。在纲层次上对分离到的土壤动物进行分类,蛛形纲(Arachnida)、昆虫纲(Insecta)、弹尾纲(Collembola)均为优势类群。其中,蛛形纲(Arachnida)包含5目63科101属,个体数占总捕获量的73.51%;昆虫纲(Insecta)包含13目22科27属,个体数占捕获量的14.90%;弹尾纲(Collembola)包含3目6科13属,个体数占捕获量的11.59%。在属水平上,

表 1 小型土壤节肢动物群落组成及数量
Table 1 Taxonomic composition and individual abundances of soil microarthropod communities

类群数 Groups	CK 个体数 ind.	N						P						NP						总计 Total									
		N ₁₀		N ₂₀		N ₃₀		合计		P ₁₀		P ₂₀		P ₃₀		合计		NP ₁₀		NP ₂₀		NP ₃₀		合计		个体数 ind.	百分比 Percent		
		个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.	个体数 ind.				
蛛形纲 Arachnida	49	51	58	76	76	185	45	93	49	187	125	745	396	1266	1687	73.51													
甲螨亚目 Oribatida	16	20	33	23	23	76	25	50	33	108	89	602	327	1018	1218	53.07													
单奥甲螨属 <i>Phauloppia</i>	7		5	5	5	10	1	7		8	2	129	58	189	214	9.32													
广缝甲螨属 <i>Cosmochthonius</i>	2	2	1	6	6	9	2	4	2	8	3	123	29	155	174	7.58													
庭甲螨属 <i>Domotorina</i>		1				1																							
拟上罗甲螨属 <i>Epilohmannoides</i>																													
上罗甲螨属 <i>Epilohmannia</i>	1		1	1	1	2		3	1	4	20	26	24	70	74	3.22													
多奥甲螨属 <i>Multioippia</i>				1	1	1	2	2	2	6	7	22	20	49	56	2.44													
新胎甲螨属 <i>Neoribates</i>			1	1	1	2		1		1	2	26	19	47	50	2.18													
隐奥甲螨属 <i>Cryptoppia</i>		2	2	1	1	5	1	1		2		24	19	43	50	2.18													
原甲螨属 <i>Archegozetes</i>				2	2	2	8			8	1	8	29	38	48	2.09													
黑尖棱甲螨属 <i>Melanozetes</i>				2	2	2	1	1		2	4	24	14	42	46	2.00													
小奥甲螨属 <i>Oppiella</i>	1					0	1	2	2	5	6	20	11	37	43	1.87													
盖头甲螨属 <i>Tectocephus</i>		1				1	3	4	9	16	6	5	7	18	35	1.53													
小缝甲螨属 <i>Hypochthoniella</i>	2	9				9	1		1	2	3	14	2	19	32	1.39													
梁甲螨属 <i>Lamellobates</i>							2	3	1	6	1	12	9	22	28	1.22													
刀肋甲螨属 <i>Furcoribula</i>						2					2	7	15	24	26	1.13													
尖棱甲螨属 <i>Ceratozetes</i>											6	13	6	25	25	1.09													
原大翼甲螨属 <i>Protokalamna</i>			1			1	1			1	4	14	2	20	22	0.96													
礼服甲螨属 <i>Thyrophichthonius</i>			2	1		3					3	10	2	15	18	0.78													
日本汉甲螨属 <i>Nippohermannia</i>				1		1		2		2	1	5	4	10	13	0.57													
圆单翼甲螨属 <i>Peloribates</i>	1		9	1	1	10		1	1	1	1			1	13	0.57													
半櫛甲螨属 <i>Heminochrus</i>								1	1	1	1	5		11	12	0.52													
櫛甲螨属 <i>Nothrus</i>								7		7	2	3		5	12	0.52													
细若甲螨属 <i>Incabates</i>						1						1	7	8	9	0.39													
真罗甲螨属 <i>Eulohmannia</i>			1			1							6	6	7	0.31													
洼甲螨属 <i>Cepheus</i>										2																			
矮汉甲螨属 <i>Nanhermannia</i>													3	1	6	0.26													
奥甲螨属 <i>Oppia</i>											3	1		4	4	0.17													

续表

类群数 Groups	CK 个体数 ind.	N						P						NP			总计				
		N ₁₀		N ₂₀		N ₃₀		P ₁₀		P ₂₀		P ₃₀		NP ₁₀		NP ₂₀		NP ₃₀		Total	百分比 Percent
		个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.	个体数 ind.	合计 ind.		
赫甲螨属 <i>Hermannia</i>																					
盲甲螨属 <i>Malacoconothrus</i>						1	1	1	2				3						4	4	0.17
平櫟甲螨属 <i>Platynothrus</i>				3	3												1		1	4	0.17
异櫟甲螨属 <i>Allonothrus</i>				3	3				1				1						4	4	0.17
孔翼甲螨属 <i>Porogalumella</i>	1			1	1											1		1	3	0.13	
顶甲螨属 <i>Tegoribates</i>														2				2	2	0.09	
顶翼甲螨属 <i>Acrogalumna</i>														2				2	2	0.09	
广汉甲螨属 <i>Cosmohermannia</i>		2	2								1	1	2						2	2	0.09
简单缝甲螨 <i>Haplochothonius simplex</i>																					
菌甲螨属 <i>Scheloribates</i>														2				2	2	0.09	
琴甲螨属 <i>Lyroppia</i>										2			2						2	2	0.09
全单翼甲螨属 <i>Peryxlobates</i>																2		2	2	0.09	
跳甲螨属 <i>Zetorchestoid</i>											2	2	2						2	2	0.09
窝甲螨属 <i>Fosserenus</i>		2	2																2	2	0.09
异珠足甲螨属 <i>Heterobelba</i>														2				2	2	0.09	
地缝甲螨属 <i>Gehypochthonius</i>		1	1																1	1	0.04
缝甲螨属 <i>Hypochthonius</i>																1		1	1	0.04	
广大翼甲螨属 <i>Cosmogalumna</i>																			1	1	0.04
拉奥甲螨属 <i>Lauropia</i>																		1	1	0.04	
龙足甲螨属 <i>Eremaeus</i>											1	1	1						1	1	0.04
微奥甲螨属 <i>Microppia</i>								1					1						1	1	0.04
枝奥甲螨属 <i>Ramusella</i>	1																				
中气门亚目 <i>Mesostigmata</i>	19	22	55	12	21			11	38	24	3	3	38	29	108	41	178	290	12.64	12.64	
脮螨属 <i>Rhodacarus</i>	11	18	24	3	3				10	8	2	2	10	2	25	2	29	74	3.22	3.22	
土厉螨属 <i>Ololaelaps</i>		1	8	1	6			1	1				1	5	24	4	33	42	1.83	1.83	
小革螨属 <i>Gamasellus</i>			7	3	4				5	5			5	1	8	7	16	28	1.22	1.22	
厉螨属 <i>Laelaps</i>								4	5	1			5	3	15	2	20	25	1.09	1.09	
派盾螨属 <i>Parholaspis</i>			1	1			1	1	2	1			2	4	5	8	17	20	0.87	0.87	
小腮螨属 <i>Rhodacarellus</i>	5		6		6									3	4		7	18	0.78	0.78	
前小派盾螨属 <i>Proparholaspulus</i>	1		3	3					1		1	1	1	1	6	4	11	16	0.70	0.70	

续表

类群数 Groups	CK 个体数 ind.	N				P				NP				总计 Total										
		N ₁₀		N ₂₀		N ₃₀		合计		P ₁₀		P ₂₀		P ₃₀		合计								
		个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent	个体数 ind.	百分比 Percent							
植绥螨科 Phytoseiidae	1		1		1		1		1		3		8		3		14		16		0.70			
表刻螨科 Eperidae	1		1								2		6		4		12		13		0.57			
革伊螨属 Gamasiphis										1			4		2		6		7		0.31			
滑下盾螨属 Hypoaspis lubrica	1	1		1		2		2		1								3		6		0.26		
厚绥螨属 Pachyseius	1		1			1		1		1					2		2		5		0.22			
长咽螨属 Rhodacarus						2		2		1					2		2		5		0.22			
厚厉螨属 Pachylaelaps								1		1			2				4		5		0.22			
小派盾螨属 Parholaspulus												2		1		2		3		3		0.13		
寄螨属 Parasitus																		2		2		0.09		
全盾螨属 Holaspulus					1		1											1		1		0.04		
下盾螨属 Hypoaspis										1								1		1		0.04		
真伊螨科 Eviplididae										1								1		1		0.04		
革厉螨属 Gamasolaelaps																					0.04			
皮刺螨科 Dermanyssidae																					0.04			
前气门亚目 Prostigmata	14	9	13		32			54		9	19		13		7		33		28		177		7.71	
细须螨科 Caligonellidae		1	6		11			18		1	1		3					5		5		28		1.22
跗螯螨科 Tarsocheylidae	11	1			4			5			5						1				22		0.96	
次麦蒲螨 Mahulania secunda			1		9			10		4	1					4				2		21		0.92
螯长须螨属 Cheylostigmaeus	2				3			3		1	4								3		13		0.57	
针吸螨属 Terpnacaridae											1						5		4		10		0.44	
蠃螯螨科 Cheylritidae		1	1					2					7								9		0.39	
盾螨科 Scutacaridae			1					1			2		1		1		2		1		8		0.35	
朱亮纤赤螨 Leptus zhutingensis					1			1									5		1		7		0.31	
肉食螨科 Pomerantziidae		2						2									3				7		0.31	
布伦螨属 Allopemphorus chinensis											1						5				6		0.26	
厚颚螨科 Pachygnathidae			2					2									2		1		5		0.22	
新梳新拟巨须螨 Neocuxoides neopectinatus																	3		1		4		0.17	
无爪螨科 Bdellidae		1						1			1				2						4		0.17	
纤赤螨属 Leptus		1	1					2		1			1								4		0.17	
小真古螨科 Nanorchestidae																			3		3		0.13	

续表

类群数 Groups	CK		N			P			NP			总计		
	个体数 ind.	合计 ind.	N ₁₀ 个体数 ind.	N ₂₀ 个体数 ind.	N ₃₀ 个体数 ind.	P ₁₀ 个体数 ind.	P ₂₀ 个体数 ind.	P ₃₀ 个体数 ind.	NP ₁₀ 个体数 ind.	NP ₂₀ 个体数 ind.	NP ₃₀ 个体数 ind.	Total		
												个体数 ind.	百分比 Percent	
后长须螨属 <i>Apostigmaeus</i>							1				2	2	3	0.13
蛞蝓螨科 Tydeidae					1			1		1		1	3	0.13
麦氏螨属 <i>Mahunkania</i>														
树双瘤吸螨 <i>Spinibdella</i>									2			2	2	0.09
长须螨属 <i>Stigmaeus</i>										1	1	2	2	0.09
矮蒲螨属 <i>Pygmephorus</i>					1				1			1	2	0.09
隐爪螨科 Ereyneidae					1						1	1	2	0.09
中国奇矮螨 <i>Alicorhagiidae</i>						1					1	1	2	0.09
多室赤螨属 <i>Balaustium</i>			1		1								2	0.09
桃土螨科 Microdispidae	1		1										2	0.09
板浦螨属 <i>Petalonium</i>									1			1	1	0.04
介六新鄂螨 <i>Eupalopsellidae</i>											1	1	1	0.04
贵阳缝颚螨 <i>Raphignathus guiyuanensis</i>						1							1	0.04
喜螨科 Tenuipalpidae			1										1	0.04
无气门亚目 Astigmata										1			1	0.04
叶爪螨属 <i>Penthaleus</i>										1		1	1	0.04
蜘蛛目 Araneae										1		1	1	0.04
隆头蛛属 <i>Eresus</i>														
昆虫纲 Insecta	4	13	8		5	3	92	3	79	57	78	214	342	14.90
同翅目 Homoptera		12	1			2	85	1	57	22	58	137	238	10.37
球蚜科 Adelgidae		12	1			1	85	1	48	13	57	118	218	9.50
蛱科 Coccidae									9	7	1	17	17	0.74
短痣蚜科 Anoeciidae										2		2	2	0.09
麦蚜螨科 Gixiidae						1							1	0.04
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae			6		1		1		4	22	6	32	40	1.74
叩甲科 Elateridae			2				1		2	20	5	27	30	1.31
长角沼甲科 Ptilodactylidae			2						1	2	1	4	6	0.26
象甲科 Curculionidae			1						1			1	2	0.09
步甲科 Carabidae			1										1	0.04
金龟甲科 Scarabaeidae					1								1	0.04

续表

类群数 Groups	CK 个体数 ind.	N						P						NP						总计 Total		
		N ₁₀		N ₂₀		N ₃₀		P ₁₀		P ₂₀		P ₃₀		NP ₁₀		NP ₂₀		NP ₃₀		合计 个体数 ind.	百分比 Percent	
		个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.	个体数 ind.	百分比 ind.			
缨翅目 Thysanoptera																						
斑管蓟马属 <i>Stigmothrips</i>																						
棘管蓟马属 <i>Dinothrips</i>																						
栓蓟马科 Chirothripoididae																						
尾蓟马科 Urothripidae																						
啮虫目 Corrodentia	2	1	1	2	4	3	2	5	3	1	1	1	7	6	13	17	0.74					
书虱科 Liposcelidae	2	1	1	2	4	3	2	5	3	1	1	1	5	5	10	14	0.61					
膜翅目 Hymenoptera																						
蚁属 <i>Formica</i>																						
短猛蚁属 <i>Brachyponera</i>																						
切叶蚁属 <i>Myrmecina</i>																						
草蚁属 <i>Lasius</i>																						
举腹蚁属 <i>Grematogaster</i>																						
等翅目 Isoptera																						
木白蚁科 Kalotermitidae																						
鞘翅目 Coleoptera adult																						
象甲科 Curculionidae																						
斑莹甲科 Tetratomidae																						
金龟甲科 Scarabaeidae																						
直翅目 Orthoptera																						
蚱总科 Tetrigidae																						
鳞翅目 Lepidocampinae	2																					
夜蛾科 Noctuidae	2																					
半翅目 Hemiptera				1	1																	
臭虫科 Cimicidae				1	1																	
毛翅目 Trichoptera																						
角石蛾科 Stenopsychidae																						
双翅目 Diptera adult																						
瘿蚊科 Cecidomyiidae																						
双翅目幼虫 Diptera larvae																						

续表

类群数 Groups	CK 个体数 ind.	N			P			NP			总计 Total	
		N ₁₀ 个体数 ind.	N ₂₀ 个体数 ind.	N ₃₀ 个体数 ind.	P ₁₀ 个体数 ind.	P ₂₀ 个体数 ind.	P ₃₀ 个体数 ind.	NP ₁₀ 个体数 ind.	NP ₂₀ 个体数 ind.	NP ₃₀ 个体数 ind.	合计 个体数 ind.	百分比 Percent
舞虻科 Empididae												
弹尾纲 Collembola	13	22	15	30	19	20	16	1			1	0.04
原蛱目 Poduromorpha	9	20	9	30	16	10	15	12	81	38	131	11.59
奇蛱属 Xenylla	6	1	8	2		8	5	10	67	21	98	9.02
球角蛱属 Hypogastrura	2	12	1	27	8		8	6	37	11	54	3.66
伪亚蛱属 Pseudachorutes	1	4		1	1	1	1	1	9	3	13	3.09
棘蛱属 Onychiurus								3	4	2	9	1.26
短吻蛱属 Paranura					7			2			7	0.48
副蛱属 Brachystomella		3									7	0.31
长角蛱目 Entomobryomorpha	4	2	6		3	10	1			2	2	0.22
符蛱属 Coloburella		2	5		2	6		2	13	17	32	2.53
类符蛱属 Folsomia	2				1	3		1	10	13	24	1.70
库蛱属 Coloburella	2		1							2	2	0.35
二刺蛱属 Uzelia								1		1	2	0.22
鳞长蛱属 Lepidocyrtus						1			3	1	4	0.17
小等蛱属 Isotomiella							1	1			1	0.04
愈腹蛱目 Symphyleona									1		1	0.04
小圆蛱属 Sminthurinus									1		1	0.04
总计 Total	66	86	81	111	278	205	68	216	883	512	1611	100.00

N: 施氮肥; P: 施磷肥; NP: 氮磷混施; 10、20、30 代表施用量为 10g/m²、20g/m²、30g/m²

没有优势类群,常见类群包括单奥甲螨属(*Phauloppia*)、球蚜科(*Adelgidae*)等 27 属,占总捕获量的 74.92%;稀有类群包括原大翼甲螨属(*Protokalumna*)、跗螯螨科(*Tarsocheylidae*)等 114 属,占总捕获量的 25.08%。从类群组成和个体数来看,蛛形纲是高寒草甸土壤节肢动物群落的主要组成部分。

不同施肥种类间土壤节肢动物的群落组成存在一定差异。在施 N 肥的样地中,共分离到土壤节肢动物 278 个,隶属于 3 纲 10 目 51 科 68 属,优势类群为球角跳属(*Hypogastrura*),占该样地捕获量的 14.39%。在施 P 肥的样地中,共分离到土壤动物 340 个,隶属于 3 纲 10 目 51 科 71 属,优势类群为球蚜科(*Adelgidae*),占该样地捕获量的 25.59%。在 NP 混施的样地中,共分离到土壤动物 1611 个,隶属于 3 纲 19 目 73 科 111 属,优势类群为单奥甲螨属(*Phauloppia*),占该样地捕获量的 11.73%。而在对样地中,共分离到土壤动物 66 个,隶属于 3 纲 7 目 18 科 23 属,优势类群为跗螯螨科(*Tarsocheylidae*)、咽螨属(*Rhodacarus*)、单奥甲螨属(*Phauloppia*),分别占该样地捕获量的 16.67%、16.67%、10.61%。由此可知,施肥能够显著增加小型土壤节肢动物群落的类群数和个体数,且 NP 混施时对小型土壤节肢动物群落的类群数和个体数组成的影响更明显,施同种肥料时,20 g/m²的样地土壤动物群落组成最复杂。

3.2 小型土壤节肢动物群落结构差异

同一施肥种类的不同施肥梯度间小型土壤节肢动物群落结构均有明显差异(图 1)。N 肥的不同施肥梯度间,在 PC1 轴上影响小型土壤节肢动物群落结构的主要类群是咽螨属(*Rhodacarus*),在 PC2 轴上主要是球角跳属(*Hypogastrura*);P 肥的不同施肥梯度间,在 PC1 轴上影响群落结构的主要类群是球蚜科(*Adelgidae*),

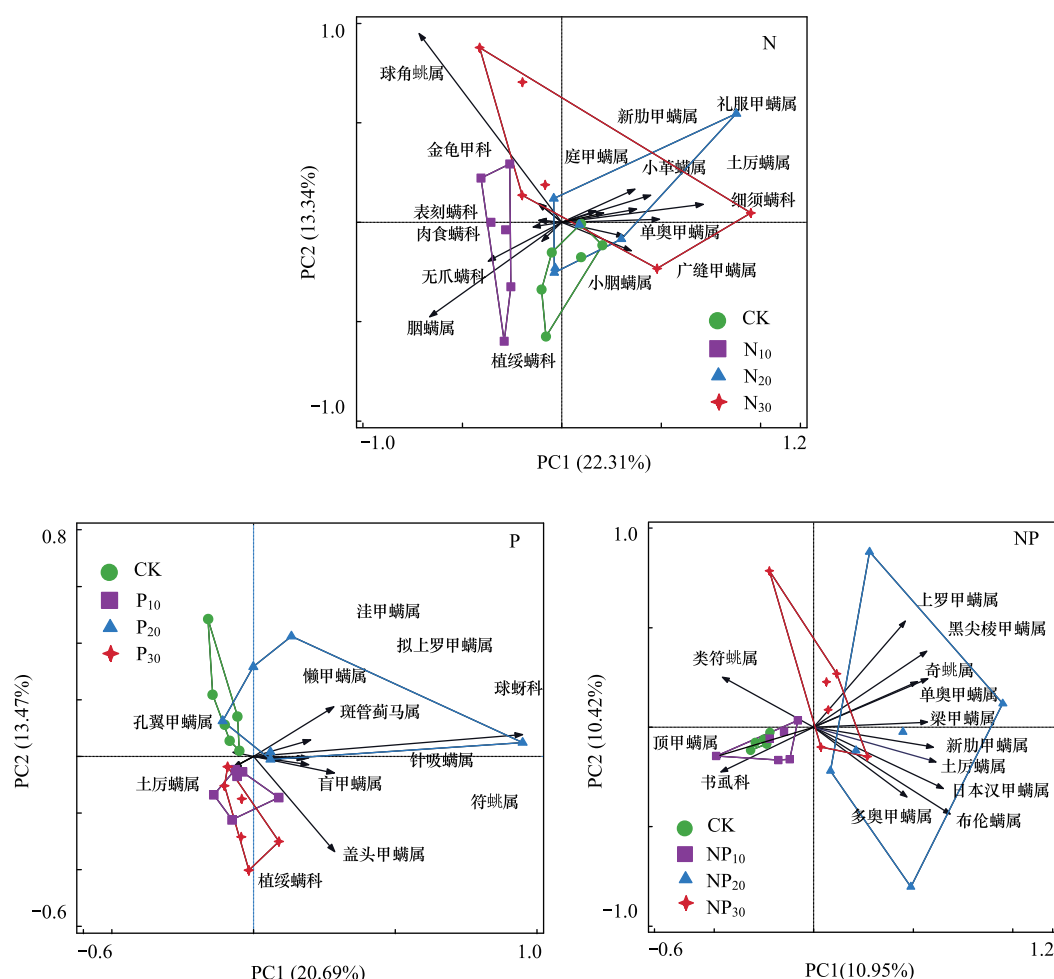


图 1 同一施肥种类不同施肥梯度间小型土壤节肢动物群落排序

Fig.1 Principal component analysis on the soil microarthropod communities among different gradients of the same fertilizer

在 PC2 轴上主要影响类群是盖头甲螨属 (*Tectocephus*) ; NP 混施的不同施肥梯度间, 在 PC1 和 PC2 轴上影响群落结构的主要类群分别是顶甲螨属 (*Tegoribates*) 和上罗甲螨属 (*Epilohmannia*) 。

同一施肥梯度不同施肥种类间小型土壤节肢动物的群落结构也存在差异, 随着施肥梯度的增加, 影响小型土壤节肢动物群落结构的主要类群也不同 (图 2) 。施 10 g/m² 时, 在 PC1 轴和 PC2 轴上影响小型土壤节肢动物群落结构的主要类群均为球蚜科 (*Adelgidae*) ; 施 20 g/m² 时, 在 PC1 轴上影响小型土壤节肢动物群落结构的主要类群是广缝甲螨属 (*Cosmochthonius*) , 在 PC2 轴上主要是庭甲螨属 (*Dometorina*) ; 施 30 g/m² 时, 在 PC1 轴上影响群落结构的主要类群是单奥甲螨属 (*Phauloppia*) , 在 PC2 轴上主要影响类群是广缝甲螨属 (*Cosmochthonius*) 。此外, 随着施肥梯度的增加, CK、施 N 肥和施 P 肥的土壤节肢动物群落结构差异越来越小, 但三者与 NP 混施肥的差异越来越大 (图 2) 。

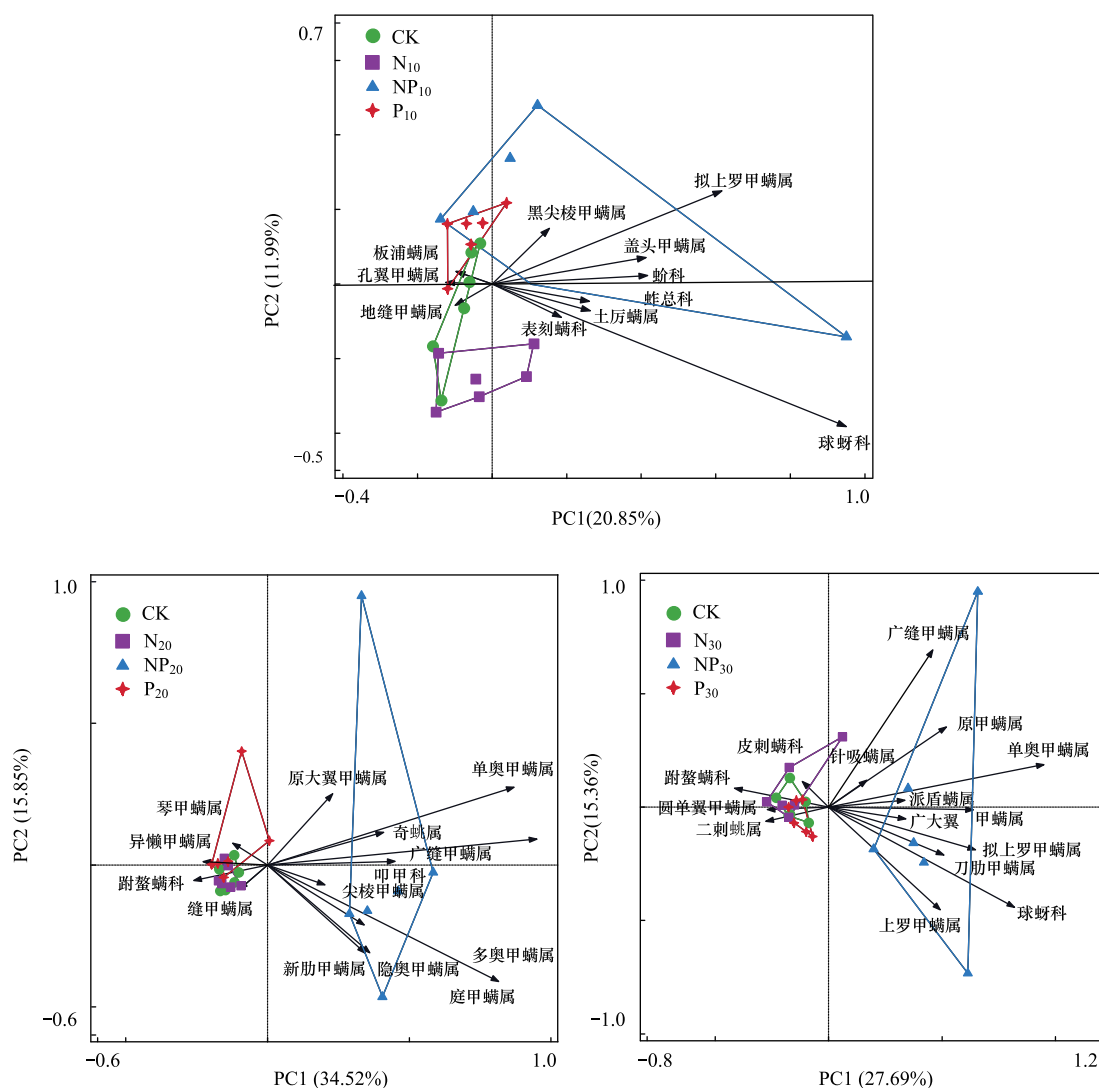


图 2 同一施肥梯度不同施肥种类间小型土壤节肢动物群落排序

Fig.2 Principal component analysis on the soil microarthropod communities among different fertilizers on the same gradient

N: 施氮肥; P: 施磷肥; NP: 氮磷混施; 10、20、30 代表施用量为 10g/m²、20g/m²、30g/m²

3.3 小型土壤节肢动物群落密度及多样性差异

N、P、NP 三种施肥种类小型土壤节肢动物的个体密度、类群数、多样性指数呈显著增加趋势, 而均匀度指数无明显变化 (图 3) 。施肥梯度上, 当施肥量为 20 g/m² 时, 在施 P 和 NP 样地小型土壤节肢动物的个体密度、

类群数、多样性指数达到最大值。双因素方差分析结果表明(表 2),施肥种类、梯度以及其交互作用对小型土壤节肢动物群落的个体密度、类群数、多样性指数均有显著影响($P<0.05$),对均匀度指数无显著影响。

在施 N 肥中,小型土壤节肢动物群落仅有均匀度指数在施肥梯度间存在显著差异($P<0.05$)。施 P 肥中,仅有类群数在施肥梯度间存在显著差异($P<0.05$)。NP 混施肥中,小型土壤节肢动物群落的个体密度、类群数、多样性指数随着施肥梯度的增加呈先上升后下降的趋势,在 NP₂₀ 达到最大值,且 NP₂₀ 和 NP₃₀ 的个体密度、类群数、多样性指数显著高于 CK、NP₁₀ ($P<0.05$)。以上结果表明,小型土壤节肢动物群落的多样性在各施肥种类、梯度间均有差异,且受施肥种类和施肥梯度交互作用的影响。

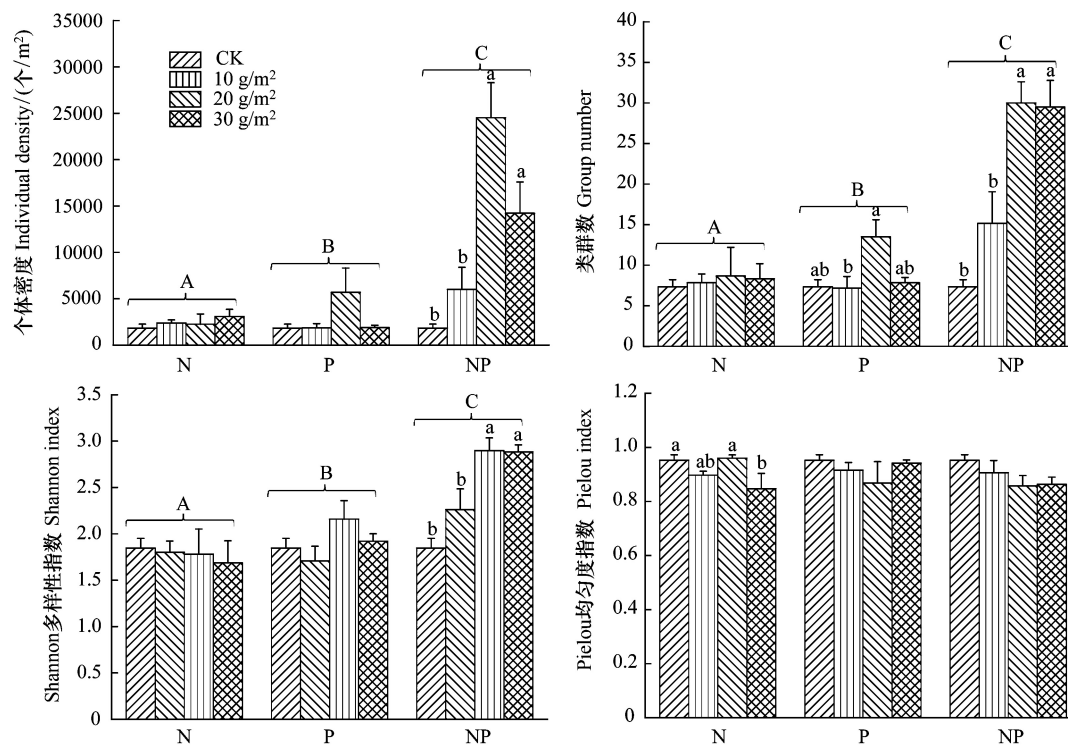


图 3 不同施肥种类小型土壤节肢动物群落密度及多样性(平均值±标准误)

Fig.3 The individual density and diversity indices of soil microarthropod communities among different treatments (Mean±SE)

不同大写字母表示不同施肥种类中差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一施肥种类不同施肥梯度差异显著($P<0.05$)

表 2 不同施肥种类间小型土壤节肢动物群落密度及差异性分析

Table 2 Results of two-way ANOVA on the individual density and diversity indices of soil microarthropod communities

施肥 Fertilization	df	个体密度 Individual density		类群数 Taxonomic richness		多样性指数(H) Shannon index		均匀度指数(E) Pielou index	
		F	P	F	P	F	P	F	P
种类 Treatment	2,60	32.08	<0.001	32.60	<0.001	17.63	<0.001	0.21	0.81
梯度 Gradient	3,60	13.78	<0.001	17.27	<0.001	6.93	<0.001	2.38	0.08
种类 Treatment×梯度 Gradient	6,60	8.42	<0.001	5.70	<0.001	4.67	0.001	0.54	0.78

3.4 环境因子与小型土壤节肢动物群落的关系

典范对应分析(CCA)对单施 N、P 和 NP 混施同一施肥种类不同施肥梯度中小型土壤节肢动物群落排序(图 4)表明:第 1、2 排序轴对小型土壤节肢动物和土壤环境因子关系的解释率分别为 7.30%和 7.03%、8.26%和 6.52%、6.98%和 5.61%;

单施 N 肥中,第一排序轴解释的信息量不显著,但所有排序轴解释的信息量具有显著性($F=1.3$, $P=$

0.002); 第 1 排序轴与有机质含量(SOM)呈显著负相关($P<0.05$); 第 2 排序轴与地上生物量(AB)呈显著负相关($P<0.05$) (图 4)。单施 P 肥中, 第 1 排序轴($F=0.3$, $P=0.01$) 和所有排序轴($F=1.3$, $P=0.002$) 解释的信息量均具有显著性($F=1.3$, $P=0.002$)。其中, 第 1 排序轴与有机质含量(SOM)呈显著负相关($P<0.05$), 第 2 排序轴的主要影响因子为土壤 pH 和群落盖度(Co) (图 4)。NP 混施中, 第一排序轴和所有排序轴解释的信息量均不显著; 第 1 排序轴的主要影响因子为土壤 pH 和群落盖度(Co); 第 2 排序轴的主要影响因子为有机质含量(SOM) (图 4)。由此可知有机质含量(SOM)是影响小型土壤节肢动物群落组成的主要环境因子。

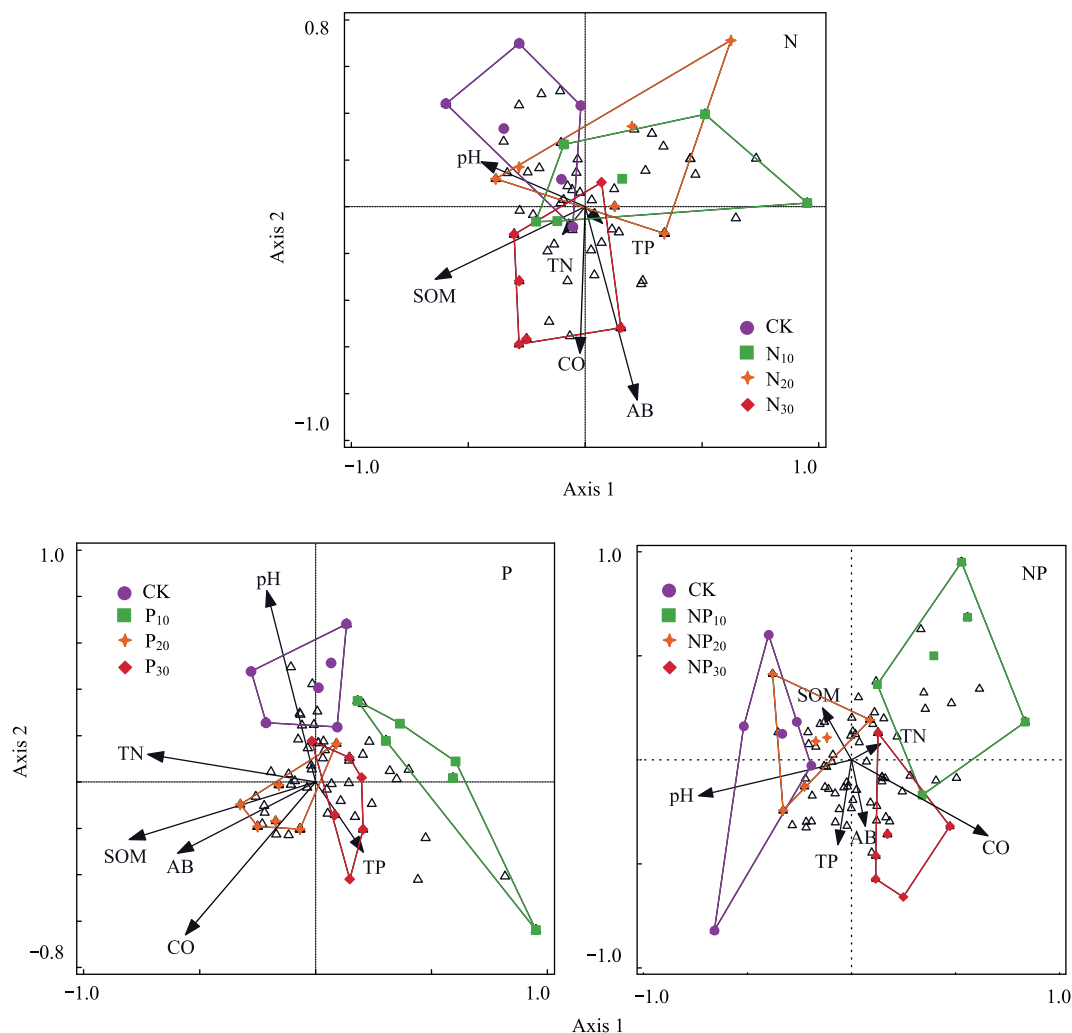


图 4 小型土壤节肢动物群落与环境因子的典范对应分析

Fig.4 Canonical correspondence analysis on the relationship between soil microarthropods and environmental factors

TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; SOM: 有机质 Soil organic matter; AB: 地上生物量 Aboveground biomass; CO: 群落盖度 Coverage

小型土壤节肢动物群落各参数与环境因子的回归分析(表 3)结果表明, 类群数与 pH 呈显著负相关($P<0.05$), 个体密度与全氮含量呈显著正相关($P<0.05$), 而全磷含量与个体密度、类群数、Shannon 多样性指数均呈显著正相关($P<0.05$)。

4 讨论

4.1 施肥对小型土壤节肢动物群落结构的影响

高寒草甸小型土壤节肢动物群落组成在施肥后发生明显变化,表明施肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落有明显影响。首先,3 种不同施肥种类均使小型土壤节肢动物的类群数增加。其原因可能是与对照相比,施肥改善土壤深层结构,降低土壤致密性,刺激了植物根系生长,增加了微生物的数量^[29],有利于根食性和菌食性等各类小型土壤节肢动物生长和繁殖。而其他研究也表明,食物资源的多寡和环境条件改变是影响小型土壤节肢动物群落结构的主要原因^[30]。其次,在单施 N、P、NP 混施中,特有类群大部分属于螨类。有研究表明施肥可以提高土壤有机质的含量^[31],改善土壤孔隙度和通气状况并降低土壤容重^[10],这些变化更有利于多种土壤螨类的生存和繁殖^[32]。而在 NP 混施中,特有土壤昆虫类群数仅次于特有土壤螨类群数,可能是因为与对照、单施 N 和 P 肥相比,NP 混施显著增加了土壤自然含水量和贮水量^[33]。而土壤水分是氧的载体,可以导致某些需要土壤高湿度的土壤昆虫,如鞘翅目、双翅目幼虫等种类增加^[34];此外,氮磷混施能缓解青藏高原高寒草甸植物生长的营养限制,促进植物生长^[35],从而给小型土壤节肢动物提供更加充足的食物资源和栖息环境。

表 3 小型土壤节肢动物与环境因子间的回归分析

Table 3 Results from regression analysis on the relationships between soil microarthropods and environmental factors

环境变量 Environmental variables	个体密度 Individual density	类群数 Taxonomic richness	多样性指数(H) Shannon index	均匀度指数(E) Pielou index
pH		-0.26 *		
有机质 Soil organic matter/(g/kg)				
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.29 *			
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.27 *	0.42 **	0.41 **	
地上生物量 Aboveground biomass/(g/kg)				
群落盖度 Coverage/%				

* 表示显著性水平 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

4.2 施肥对小型土壤节肢动物群落多样性的影响

三种施肥种类中,NP 混施处理小型土壤节肢动物群落的个体密度、多样性指数显著高于 N、P 单施,主要是由于 NP 混施中的单奥甲螨属和广缝甲螨属的个体密度显著增加。而单奥甲螨属和广缝甲螨属主要为腐食性^[36],由此可知 NP 混施有利于腐食性的螨类。有研究表明,氮磷混施能更好的补充植物群落所需的营养物质,显著提高植物茎秆中粗蛋白、粗脂肪和粗灰分等营养物质含量^[37]。此外,合理的化肥混施能显著提高活性有机 C 和土壤酶活性^[38],有利于促进土壤微生物生长和繁殖^[14],也能促进土壤腐殖质的积累和提高活性腐殖质组分含量^[39],从而有利于腐食性小型土壤节肢动物。

本研究表明,当 P 和 NP 施肥量为 20 g/m^2 时,小型土壤节肢动物群落的类群数、多样性指数均最高。其原因可能是高寒草甸的土壤有机碳、微生物碳含量及代谢活性在施肥量为 20 g/m^2 时最高^[40],改善了土壤水分、降低土壤容重、增加土壤透气性等小型土壤节肢动物生存的微环境,可以促进小型土壤节肢动物的活动、增加小型土壤节肢动物群落多样性^[41]。且当施肥量为 20 g/m^2 时,三种施肥样地的土壤 pH 值均最低,这可能是在当施肥量为 20 g/m^2 时,显著增加了微生物的数量,提高了微生物的活性,促进腐殖质和腐殖酸的形成,降低土壤 pH。而本文发现土壤 pH 与小型土壤节肢动物群落类群数呈负相关(表 3),在高寒草甸的其他研究中也有类似的发现^[42]。因此,土壤维持适当的酸性有利于提高土壤动物多样性。

此外,本研究还发现全磷含量与小型土壤节肢动物群落的个体密度、类群数、Shannon 多样性指数呈正相关,表明土壤磷含量是影响土壤节肢动物群落的重要因子。这与其他研究结果具有一致性^[30]。在一定范围内,提高土壤磷含量能提高地上植物初级生产力^[43],而植物是土壤节肢动物的直接和间接食物来源^[44]。因此,适当增加土壤磷含量能提高小型土壤节肢动物群落密度和多样性。此外,其他研究还发现小型土壤节肢动物群落的个体密度与群落盖度、地上生物量、有机质含量呈显著正相关^[45-46]。本研究中植物群落盖度、地

上生物量、有机质含量与小型土壤节肢动物的个体密度无显著相关关系,但其变化趋势总体上与小型土壤节肢动物群落多样性趋于一致。

本文表明,施加 N、P 尤其 NP 混施肥,能明显改变小型土壤节肢动物群落组成结构,增加其群落密度及多样性;且当施肥量为 20 g/m²时, NP 混施中,小型土壤节肢动物群落的密度和的多样性指数均达到最大值。因此建议,按照 20 g/m²的量对高寒草甸进行 NP 混施,以提高小型土壤节肢动物群落多样性及其生态功能。本研究仅初步探索施肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落影响,但对于施肥,尤其是 NP 混施导致小型土壤节肢动物群落的类群数增加的具体机制还不清楚,今后有必要从植物、土壤等多方面深入研究施肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落多样性的影响机制。

5 结论

高寒草甸中施加氮、磷肥以及氮磷混施能明显改变小型土壤节肢动物的群落组成结构,显著增加小型土壤节肢动物的群落密度和多样性。当施肥量为 20 g/m²时,单施磷肥和氮磷混施均使小型土壤节肢动物的群落密度和多样性达到最大值。磷含量是影响小型土节肢动物群落密度和多样性的主要因子。因此,建议对高寒草甸进行适量的氮磷混施,以提高小型土壤节肢动物群落密度和多样性,增强高寒草甸生态系统地下物质循环功能。

参考文献 (References):

- [1] Wu P F, Zhang H Z, Wang Y. The response of soil macroinvertebrates to alpine meadow degradation in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Applied Soil Ecology*, 2015, 90: 60-67.
- [2] 武高林, 杜国祯. 青藏高原退化高寒草地生态系统恢复和可持续发展探讨. *自然杂志*, 2007, 29(3): 159-164.
- [3] Shang Z H, Long R J. Formation causes and recovery of the "Black Soil Type" degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers of Agriculture in China*, 2007, 1(2): 197-202.
- [4] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Jing Z C, Shi J J. Changes in plant diversity, biomass and soil C, in alpine meadows at different degradation stages in the headwater region of three rivers, China. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(2): 187-198.
- [5] 郝爱华, 薛娴, 彭飞, 尤全刚, 廖杰, 段翰晨, 黄翠华, 董斯扬. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究. *生态学报*, 2020, 40(3): 964-975.
- [6] 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.
- [7] 郭克贞. 改良退化天然草地综合技术经济效益研究. *草业科学*, 1996, 13(2): 24-28.
- [8] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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): 7697-7708.
- [12] 代迪, 字洪标, 杨有芳, 阿的鲁骥, 陈焱, 罗雪萍, 王长庭. 高寒草甸土壤微生物功能多样性对氮肥添加的响应. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 137-144.
- [13] 字洪标, 陈焱, 胡雷, 王长庭. 氮肥添加对川西北高寒草甸植物群落根系动态的影响. *植物生态学报*, 2018, 42(1): 38-49.
- [14] 王长庭, 王根绪, 李香真, 王永, 字洪标, 阿的鲁骥. 氮肥添加对高寒藏嵩草 (*Kobresia tibetica*) 沼泽化草甸和土壤微生物群落的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 405-415.
- [15] 孙金金, 汪鹏斌, 徐长林, 贺有龙, 汪海波, 李亚娟, 鱼小军. 不同施肥水平对果洛高寒草甸草地的影响. *草原与草坪*, 2019, 39(4): 25-30.
- [16] Wu P F, Liu X L, Liu S R, Wang X L, Wang Y. Composition and spatio-temporal variation of soil microarthropods in the biodiversity hotspot of northern Hengduan Mountains, China. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 62: 30-38.
- [17] 李俊, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 彭艳, 王滨, 常晨晖. 高山草甸冬季凋落物分解过程中土壤动物对微生物群落结构的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(1): 27-34.
- [18] 周育臻, 吴鹏飞. 贡嘎山东坡森林小型土壤节肢动物群落多样性与时空分布. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 586-599.
- [19] López-Hernández D, Araujo Y, López A, Hernández-Valencia I, Hernández C. Changes in soil properties and earthworm populations induced by

- long-term organic fertilization of a sandy soil in the Venezuelan Amazonia. *Soil Science*, 2004, 169(3): 188-194.
- [20] 齐莎, 赵小蓉, 郑海霞, 林启美. 内蒙古典型草原连续 5 年施用氮磷肥土壤生物多样性的变化. *生态学报*, 2010, 30(20): 5518-5526.
- [21] 林英华, 杨学云, 张夫道, 古巧珍, 孙本华, 马路军. 长期施肥对黄土区农田土壤动物群落的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1213-1218.
- [22] 郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. *地学前缘*, 2002, 9(1): 95-102.
- [23] 雷特生, 任继生, 张学洲, 阿依丁, 郑子英, 李学森. 天山北坡高寒草甸和山地草原氮磷配方施肥的研究. *草业学报*, 1996, 5(4): 55-60.
- [24] 陈亚明, 李自珍, 杜国祯. 施肥对高寒草甸植物多样性和经济类群的影响. *西北植物学报*, 2004, 24(3): 424-429.
- [25] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [26] 李鸿兴, 隋敬之, 周士秀, 周勤, 孙洪国. 昆虫分类检索. 北京: 农业出版社, 1987.
- [27] 忻介六. 农业螨类学. 北京: 农业出版社, 1988.
- [28] 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.
- [29] Haynes R J. Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30(3): 210-216.
- [30] 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 钟红梅, 王永. 大型土壤动物群落对高寒草甸退化的响应. *土壤学报*, 2013, 50(4): 786-799.
- [31] 张爱君, 张明普. 黄潮土长期轮作施肥土壤有机质消长规律的研究. *安徽农业大学学报*, 2002, 29(1): 60-63.
- [32] 王东昌, 杨振玲, 张乃琴, 吴国明. 我国土壤螨研究现状进展. *莱阳农学院学报*, 2001, 18(1): 61-65.
- [33] 陈修斌, 邹志荣. 河西走廊旱塬长期定位施肥对土壤理化性质及春小麦增产效果的研究. *土壤通报*, 2005, 36(6): 888-890.
- [34] 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处理对农田土壤昆虫的影响. *生态学报*, 2006, 26(4): 1122-1130.
- [35] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 贺金生. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 159-166.
- [36] 周泓杨, 张健, 张丹桔, 张捷, 魏大平, 赵燕波, 赵波, 李川北. 不同郁闭度控制下马尾松(*Pinus massoniana*)人工林土壤动物群落特征. *生态学报*, 2017, 37(6): 1939-1955.
- [37] 郭剑波, 赵国强, 贾书刚, 董俊夫, 陈龙, 王淑平. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价. *草业学报*, 2020, 29(9): 85-93.
- [38] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 周睿, 张斌. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响. *土壤*, 2010, 42(3): 364-371.
- [39] 龚伟, 颜晓元, 王景燕, 胡庭兴, 宫渊波. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1245-1252.
- [40] Luo P Y, Han X R, Wang Y, Han M, Shi H, Liu N, Bai H Z. Influence of long-term fertilization on soil microbial biomass, dehydrogenase activity, and bacterial and fungal community structure in a brown soil of northeast China. *Annals of Microbiology*, 2015, 65(1): 533-542.
- [41] 张蕊, 李佳, 高梅香. 玉米秸秆处理方式对冬季黑土农田蜚蠊目和弹尾目群落结构的影响. *生态学报*, 2020, 40(22): 8315-8325.
- [42] 高艳美, 吴鹏飞. 高寒草甸退化对土壤昆虫多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(8): 2327-2336.
- [43] Sunquist E T, Broecker W S. The carbon cycle and atmospheric CO₂. *Eos*, 1986, 67(15): 191-191.
- [44] 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.
- [45] 邵珍珍, 吴鹏飞. 小型表栖节肢动物群落对高寒湿地退化的响应. *生态学报*, 2019, 39(19): 6990-7001.
- [46] 邱月, 吴鹏飞, 魏雪. 三种人工草地小型土壤节肢动物群落多样性动态及其差异. *草业学报*, 2020, 29(5): 21-32.