

网络出版时间:2018-01-10 16:16

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.04.009

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180110.1614.018.html

水氮控制对荒漠草原中小型土壤动物群落的影响

美 丽^a, 红 梅^{a,b}, 赵巴音那木拉^a, 德海山^a, 霍利霞^a, 刘鹏飞^a

(内蒙古农业大学 a 草原与资源环境学院, b 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011)

【摘 要】 【目的】了解水氮控制对荒漠草原中小型土壤动物的影响,进而从土壤动物角度解读全球变化对荒漠草原的生态效应。【方法】2014 年植物生长季,以内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗短花针茅荒漠草原为研究对象,设置对照(CK,自然降雨状态)、减雨(R)、增雨(W)、施氮(N)、减雨施氮(R+N)和增雨施氮(WN) 6 个处理,观测不同处理中小型土壤动物群落和土壤环境参数的变化。【结果】短花针茅荒漠草原共捕获中小型土壤动物 333 079.5 只/m²,隶属于节肢动物门的 4 纲 10 目 47 科,主要为弹尾纲(Collembola)、蛛形纲(Arachnida)和昆虫纲(Insecta);优势类群为疣蟬科(Neanoridae)和等节科(Isotomidae),优势类群和常见类群构成了研究样地中小型土壤动物群落主体。增雨、增雨施氮有助于提高短花针茅荒漠草原中小型土壤动物个体密度,减雨、减雨施氮处理减少中小型土壤动物个体密度,且水氮交互作用对中小型土壤动物个体密度影响表现显著,而对类群数无显著影响。短花针茅荒漠草原中小型土壤动物具有明显表聚性,各处理下 0~10 cm 土层个体密度和类群数显著高于 10~20 cm 土层($P<0.05$)。【结论】在未来降雨增加和氮沉降的全球变化背景下,中小型土壤动物个体密度的变化可能会更大。

【关键词】 中小型土壤动物群落;水氮控制;短花针茅荒漠草原

【中图分类号】 S154.6

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2018)04-0075-10

Effect of water and N treatment on meso- and micro-fauna communities in soil of desert steppe

MEI Li^a, HONG Mei^{a,b}, ZHAO Bayinnamula^a, DE Haishan^a, HUO Lixia^a, LIU Pengfei^a

(a College of Grassland, Resources and Environment, b Inner Mongolia Key Laboratory of Soil

Quality and Nutrient Resources, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of water and nitrogen treatment on soil meso- and micro-fauna communities in desert steppe to understand the ecological responses of desert steppe to global change. 【Method】 During growing season in 2014, the effects of control (CK, natural rainfall), rainfall removal (R), water addition (W), N addition (N), rainfall removal and nitrogen (R+N), and water addition and nitrogen (WN) on meso- and micro-fauna communities in soil of the *Stipa breviflora* desert steppe of Siziwang Banner, Inner Mongolia were studied. 【Result】 In *Stipa breviflora* desert steppe, a total of 333 079.5 ind/m² were captured, and they were classified into 4 phyla, 10 orders and 47 families. Collembola, Arachnida and Insecta were the major groups. The communities were dominated by Neanoridae and Isotomidae. The communities mainly consisted of dominant and common groups. Water addition and water addition combined with N addition stimulated the density of soil meso-fauna in desert steppe while rainfall removal and rainfall removal combined with N addition reduced individual density of soil fauna. The inter-

【收稿日期】 2017-01-27

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31560156);内蒙古自治区自然科学基金项目(2013ZD07)

【作者简介】 美 丽(1993—),女(蒙古族),内蒙古通辽人,在读硕士,主要从事草原土壤利用与保护研究。

E-mail:478045415@qq.com

【通信作者】 红 梅(1970—),女(蒙古族),内蒙古兴安盟人,教授,博士,主要从事草原土壤利用与保护研究。

E-mail:nmhm1970@sina.com

action between water and nitrogen had positive effect on soil fauna individual density, except for group richness. Soil meso- and micro-fauna communities in *Stipa breviflora* desert steppe had surface clustering feature, and individual number at 0–10 cm in all treatments was significantly higher than in 10–20 cm ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The density of meso- and micro-fauna is more sensitive than group richness with increasing precipitation and N deposition in future.

Key words: soil meso- and micro-fauna communities; water and nitrogen (N) treatment; *Stipa breviflora* desert steppe

土壤动物群落是陆地生态系统生物链中对环境最为敏感的类群之一^[1-2], 其多样性对土壤生态系统稳定性的维持具有重要作用, 在土壤生态系统中起着不可替代的分解者和消费者作用, 同时土壤生态因子对土壤动物的生存与活动也起着决定性影响, 特别是中小型土壤动物对环境的变化有着很高的敏感性^[3]。因此人们对土壤动物方面的研究愈加重视, 并且国内对土壤动物的研究也不断完善。

近几十年, 大气 N 化合物的沉降量明显增加^[4], 自 1961 年至 2000 年全球 N 沉降已从 14 Tg/年增加到 68 Tg/年, 预计到 2030 年全球 N 沉降量将达到 105 Tg/年^[5]。在 N 沉降最严重的欧洲和北美, 已对土壤动物群落开展了一些野外调查及一系列施肥影响试验^[6]。随着中国经济的快速发展, 我国 N 沉降较高水平的地区也在增多, 已成为全球三大 N 沉降集中地区之一^[7-9]。N 沉降量的绝大部分最终将进入土壤, 而土壤动物是陆地生态系统的主要组成部分之一, 也是生态系统功能中不可缺少的一部分^[10-11]。因此, 全面评价 N 沉降所造成的环境影响, 开展 N 沉降下土壤动物响应的研究, 对于了解陆地生态系统物质和能量的改变具有重要作用^[12]。

干旱半干旱区约占全球陆地总面积的 30%, 该区域降水稀少、水资源缺乏、生态环境极其脆弱, 对全球变化的响应十分敏感^[13]。北半球一些地区降雨格局发生改变, 极端降雨和极端干旱等事件增多^[14], 夏季降雨量减少会导致土壤含水量降低, 直接影响到土壤生物群落多样性^[15-16], 进而影响生态系统功能并且降低其对环境干扰的抵抗力^[17]。在国内, 土壤动物与降雨变化的研究主要集中在农田和森林生态系统^[18], 而关于荒漠草原土壤动物与降雨变化间关系的研究报道较少^[19], 有关水氮控制对荒漠草原土壤动物群落影响的研究尚未见报道, 严重制约了对荒漠草原生态系统的有效管理和可持续利用。

本研究以内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗短花针茅荒漠草原生态系统为研究对象, 拟探讨全球

变化背景下, 中小型土壤动物群落对控制性降雨和氮沉降增加的响应规律, 为丰富荒漠草原生态系统土壤动物群落组成基础资料, 以及荒漠草原生态系统平衡的维持及生物多样性保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗王府一队, 地理坐标 N 41°47′17″, E 111°53′46″, 海拔高度 1 450 m。试验区地处温带干旱半干旱大陆性季风气候区, 历年平均降水量为 280 mm, 主要集中在 6–9 月, 占全年降水总量的 70% 以上, 而蒸发量是其降水量的 7~10 倍。多年平均气温为 3.4℃, 月平均温度最高在 6–8 月。试验区土壤为淡栗钙土, 距地表 50~60 cm 处多出现白色钙积层。土壤有机质含量为 23.68 g/kg, 全氮含量为 1.3 g/kg。试验区属短花针茅荒漠草原地带性植被, 草地类型为短花针茅 (*Stipa breviflora*) + 冷蒿 (*Artemisia frigida*) + 无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*)。建群种为短花针茅 (*Stipa breviflora*), 优势种为冷蒿 (*Artemisia frigida*) 和无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*)。

1.2 试验设计与处理方法

水分和氮素二因素交互试验于 2010 年 8 月开始, 中小型土壤动物取样于 2014 年进行。试验共设 6 种处理, 分别为: 对照 (CK)、减雨 (R)、增雨 (W)、施氮 (N)、减雨施氮 (R+N)、增雨施氮 (WN), 每处理 6 次重复, 共 36 个小区, 小区面积为 15 m × 9 m = 135 m², 随机区组排列, 各小区间隔 2 m。增雨、减雨量为多年各月平均降雨量的 30% (58 mm)。增雨每年雨季 (5–8 月) 的月初进行, 使用喷洒装置进行模拟增雨, 水滴均匀落在样地内, 并保证不形成地表径流; 减雨全年都在进行, 使用自制的减雨架进行模拟减雨, 减雨架遮挡面积为减雨小区面积的 30%。氮素添加处理所施氮肥是 NH₄NO₃ (含氮 33%~35%), 施肥量为纯氮 10 g/m², 在每年 6 月

末或 7 月初雨季来临时一次性喷施,以防止高温干旱条件导致 NH_4NO_3 挥发。

1.3 中小型土壤动物的取样及鉴定方法

本试验从 2014 年植物生长季的 6、7、8、9 月份分别对各处理样地采样 1 次。为了消除边界效应,在每个小区中间点选取 2 个 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 采样点,采用容积为 196.25 cm^3 的环刀,两钻混一钻,分别按土壤深度 $0\sim 10\text{ cm}$ 、 $10\sim 20\text{ cm}$ 取样。中小型土壤动物采用改良的 Tullgern 干漏斗法经过 24 h 分离提取得到,将收集到的中小型土壤动物盛于体积分数 75%酒精的塑料瓶中。中小型土壤动物的分类鉴定依据尹文英^[20]《中国土壤动物检索图鉴》,在显微镜(Olympus CKX41)和体视显微镜(SZ78 系列)下对标本进行鉴定和统计,鉴定到科。个体类群等级划分标准为:个体密度占总个体密度的 10%以上为优势类群,个体密度占总个体密度的 1%~10%为常见类群,个体密度占总个体密度的 1%以下为稀有类群^[21]。

中小型土壤动物采样的同时,采集各层土壤样品进行理化性质分析。土壤铵态氮含量测定是,先

用 1 mol/L KCl 浸提,再用 FIAstar 5000 型流动注射仪测定;土壤有机质含量(SOM)采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[22];土壤 pH 采用 STARTER 2100 型酸度计(土/液(体积比)1:5)测定;土壤含水量采用烘干法测定;植被盖度采用目测法测定;地上生物量采用收割法测定,地下生物量采用漂洗法测定。

1.4 数据处理

所有试验数据统计分析均在 SAS 9.0 软件下实现,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较法(LSD)分析不同处理间数据的差异。利用 Pearson 相关系数(两尾测验)分析所捕获的中小型土壤动物个体密度、类群数与植被盖度、土壤养分的相关性。使用 Excel 2007 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 水氮控制下中小型土壤动物群落组成

水氮控制下中小型土壤动物群落组成及个体密度见表 1。

表 1 水氮控制下中小型土壤动物群落组成及个体密度

Table 1 Community composition and density of soil fauna under water and nitrogen treatment

群落组成 Community composition			个体密度/(只·m ⁻²) Density						总计 Total
纲 Classis	目 Order	科 Family	CK	R	W	N	R+N	WN	
弹尾纲 Collembola	弹尾目 Collembola	长角蛱科	509.3	509.3	509.3	1 527.9	2 037.2	2 037.2	7 130.1
		Entomobryidae	(0.98)	(1.37)	(0.77)	(2.48)	(6.90)	(2.35)	(2.14)
		棘蛱科	1 018.6	509.3	2 037.2	1 018.6	1 527.9	3 565.1	9 676.6
		Onychiuridae	(1.96)	(1.37)	(3.08)	(1.65)	(5.17)	(4.12)	(2.91)
		鳞蛱科	1 527.9	2 037.2	4 074.4	2 546.5	1 018.6	2 037.2	13 241.7
		Tomoceridae	(2.94)	(5.48)	(6.16)	(4.13)	(3.45)	(2.35)	(3.98)
		疣蛱科	10 185.9	9 676.6	9 676.6	8 148.7	3 055.8	11 204.5	51 948.2
		Neanridae	(19.61)	(26.03)	(14.62)	(13.22)	(10.34)	(12.94)	(15.60)
		跳虫科	2 546.5	509.3	1 018.6	5 602.3	2 037.2	4 583.7	16 297.5
		Poduridae	(4.90)	(1.37)	(1.54)	(9.09)	(6.90)	(5.30)	(4.89)
		球角蛱科	1 018.6	1 527.9	3 055.8	3 565.1	4 583.7	9 676.6	25 464.8
		Hypogastruridae	(1.96)	(9.59)	(4.62)	(5.79)	(15.52)	(11.18)	(7.65)
		圆蛱科	1 018.7	2 037.2	2 037.2	2 037.2	2 037.2	509.3	9 676.6
		Sminthuridae	(1.96)	(5.48)	(3.08)	(3.31)	(6.90)	(0.59)	(2.91)
		等节蛱科	10 695.2	4 583.7	5 602.3	4 583.7	3 565.1	7 639.4	36 669.3
		Isotomidae	(20.59)	(12.33)	(8.46)	(7.44)	(12.07)	(8.82)	(11.01)
蛛形纲 Arachnida	蜱螨目- 前气门亚目 Acarina - Prostigmata	短角蛱科	1 018.6	1 018.6	2 546.5	3 055.8	—	4 583.7	12 223.1
		Zetorchestidae	(1.96)	(2.74)	(3.85)	(4.96)	—	(5.29)	(3.67)
		绒螨科	1 018.6	509.3	1 018.6	2 546.5	—	—	5 093
		Trombidiidae	(1.96)	(1.37)	(1.54)	(4.13)	—	—	(1.53)
		隐颞螨科	—	1 018.6	2 037.2	1 018.6	1 018.6	509.3	5 602.3
		Cryptognathidae	—	(2.74)	(3.08)	(1.65)	(3.45)	(0.59)	(1.68)
		大赤螨科	2 037.2	1 018.6	1 018.6	—	—	509.3	4 583.7
		Anystidae	(3.92)	(2.74)	(1.54)	—	—	(0.59)	(1.38)
		镰螯螨科	—	—	509.3	—	509.3	1 527.9	2 546.5
		Tydeidae	—	—	(0.77)	—	(1.72)	(1.76)	(0.76)
		巨须螨科	—	—	509.3	1 527.9	—	509.3	2 546.5
		Cunaxidae	—	—	(0.77)	(2.48)	—	(0.59)	(0.76)
		矮蒲螨科	—	1 018.6	1 527.9	1 527.9	1 018.6	2 037.2	7 130.1
		Pygmephoridae	—	(2.74)	(2.31)	(2.48)	(3.45)	(2.35)	(2.14)
		吸螨科	1 018.6	509.3	2 546.5	1 018.6	—	—	5 093
		Bdellidae	(1.96)	(1.37)	(3.85)	(1.65)	—	—	(1.53)

表 1(续) Contiued table 1

群落组成 Community composition			个体密度/(只·m ⁻²) Density								
纲 Classis	目 Order	科 Family	CK	R	W	N	R+N	WN	总计 Total		
蛛形纲 Arachnida	蜱螨目-前气门亚目 Acarina-Prostigmata	跗线螨科 Tarsonemus	509.3 (0.98)	—	1 527.9 (2.31)	509.3 (0.83)	509.3 (1.72)	1 527.9 (1.76)	4 583.7 (1.38)		
		叶螨科 Tetranychidae	509.3 (0.98)	—	—	509.3 (0.83)	—	509.3 (0.59)	1 527.9 (0.46)		
		微离螨科 Microdispidae	1 018.6 (1.96)	—	1 018.6 (1.54)	509.3 (0.83)	509.3 (1.72)	—	3 055.8 (0.92)		
		异小黑螨科 Xenocaligonellidae	1 018.6 (1.96)	—	1 527.9 (2.31)	—	—	—	2 546.5 (0.76)		
		腾岛螨科 Teneriffidae	—	—	—	509.3 (0.83)	—	—	509.3 (0.15)		
		小赫甲螨科 Hermannella	1 018.6 (1.96)	509.3 (1.37)	1 527.9 (2.31)	1 527.9 (2.48)	—	1 527.9 (1.76)	6 111.6 (1.83)		
		龙足甲螨科 Eremaeidae	—	—	—	509.3 (0.83)	—	1 018.6 (1.18)	1 527.9 (0.46)		
		单翼甲螨科 Haplozetidae	509.3 (0.98)	509.3 (1.37)	1 018.6 (1.54)	—	509.3 (1.72)	1 527.9 (1.76)	4 074.4 (1.22)		
		礼服甲螨科 Trhypochthoniidae	3 565.1 (6.86)	2 037.2 (5.48)	4 074.4 (6.15)	3 565.1 (5.79)	509.3 (1.72)	5 093 (5.88)	18 844 (5.66)		
		上罗甲螨科 Epilohmanniidae	509.3 (0.98)	509.3 (1.37)	—	—	1 527.9 (5.17)	1 018.6 (1.18)	3 565.1 (1.07)		
	蛛目-甲螨亚目 Acarina-Oribatida	洼甲螨科 Camissiidae	—	—	3 055.8 (4.62)	1 018.6 (1.65)	—	2 546.5 (2.94)	6 620.9 (1.99)		
		阿斯加甲螨科 Astegistidae	1 018.6 (1.96)	—	1 527.9 (2.31)	—	—	1 018.6 (1.18)	3 565.1 (1.07)		
		剑甲螨科 Gustaviidae	—	—	—	509.3 (0.80)	—	—	509.3 (0.15)		
		表刻螨科 Epicriidae	—	509.3 (1.37)	—	1 018.6 (1.65)	509.3 (1.65)	2 037.2 (2.35)	4 074.4 (1.22)		
		植绥螨科 Phytoseiidae	1 018.6 (1.96)	—	1 018.6 (1.54)	509.3 (0.83)	—	—	2 546.5 (0.76)		
		厚厉螨科 Pachylaelapidae	—	—	—	—	—	1 018.6 (1.18)	1 018.6 (0.31)		
		寄螨科 Parasitidae	1 018.6 (1.96)	1 018.6 (2.74)	509.3 (0.77)	1 527.9 (2.48)	—	1 527.9 (1.76)	5 602.3 (1.68)		
		美绥螨科 Ameroseiidae	509.3 (0.98)	509.3 (1.37)	—	509.3 (0.83)	1 018.6 (3.45)	509.3 (0.59)	3 055.8 (0.92)		
		尾足螨科 Uropodidae	—	—	—	509.3 (0.83)	—	509.3 (0.59)	1 018.6 (0.31)		
		昆虫纲 Insecta	等翅目 Isoptera	鼻蜚科 Rhinotermitidae	1 018.6 (1.96)	509.3 (1.37)	1 018.6 (1.54)	509.3 (0.83)	—	2 037.2 (2.35)	5 093 (1.53)
	木蜚科 Kalotermitidae			509.3 (0.98)	—	2 037.2 (3.08)	1 527.9 (2.48)	—	1 018.6 (1.18)	5 093 (1.53)	
	蜚科 Termitidae			509.3 (0.98)	—	—	—	—	1 018.6 (1.18)	1 527.9 (0.46)	
	缨翅目 Thysanoptera			管蓟马科 Phlaeothripidae	1 018.6 (1.96)	—	509.3 (0.77)	—	509.3 (1.72)	2 037.2 (2.35)	4 074.4 (1.22)
	鞘翅目 Coleoptera larvae		缨甲科 Ptiliidae	509.3 (0.98)	509.3 (1.40)	2 037.2 (3.08)	—	509.3 (1.72)	2 037.2 (2.35)	5 602.3 (1.68)	
			步甲科 Carabidae	—	—	—	509.3 (0.83)	—	2 037.2 (2.35)	2 546.5 (0.76)	
			叩甲科 Elatridae	—	1 018.6 (2.74)	1 018.6 (1.54)	—	—	509.3 (0.59)	2 546.5 (0.76)	
			隐翅虫科 Staphylinidae	—	—	509.3 (0.77)	509.3 (0.83)	—	509.3 (0.59)	1 527.9 (0.46)	
			半翅目 Hemiptera	奇蝽科 Enicocephalidae	509.3 (0.98)	—	—	1 018.6 (1.65)	—	1 018.6 (1.18)	2 546.5 (0.76)
			双翅目 Diptera	食木虻科 Eriococcinae	509.3 (0.98)	—	—	1 018.6 (1.65)	—	1 018.6 (1.18)	2 546.5 (0.76)
	膜翅目 Hymenoptera	蚁科 Formica	1 018.6 (1.96)	1 018.6 (2.74)	2 546.5 (3.85)	3 565.1 (5.79)	509.3 (1.72)	1 018.6 (1.18)	9 676.6 (2.91)		
唇足纲 Chilopoda	地蜈蚣目 Geophilomorpha	奥地蜈蚣科 Oryidae	509.3 (0.98)	—	—	—	509.3 (1.72)	1 018.6 (0.31)			
个体密度/(只·m ⁻²) Density			51 948.2	37 178.6	66 208.5	61 624.8	29 539.2	86 580.3	333 079.5		
类群数 Group number			33	25	33	35	22	39	47		

注:括号中数据为占总个体密度的比例,单位为%。“—”表示该土壤动物类群在该处理中未被发现。

Note: The member in bracket is the ratio to total density.“—”indicates that this group was not found.

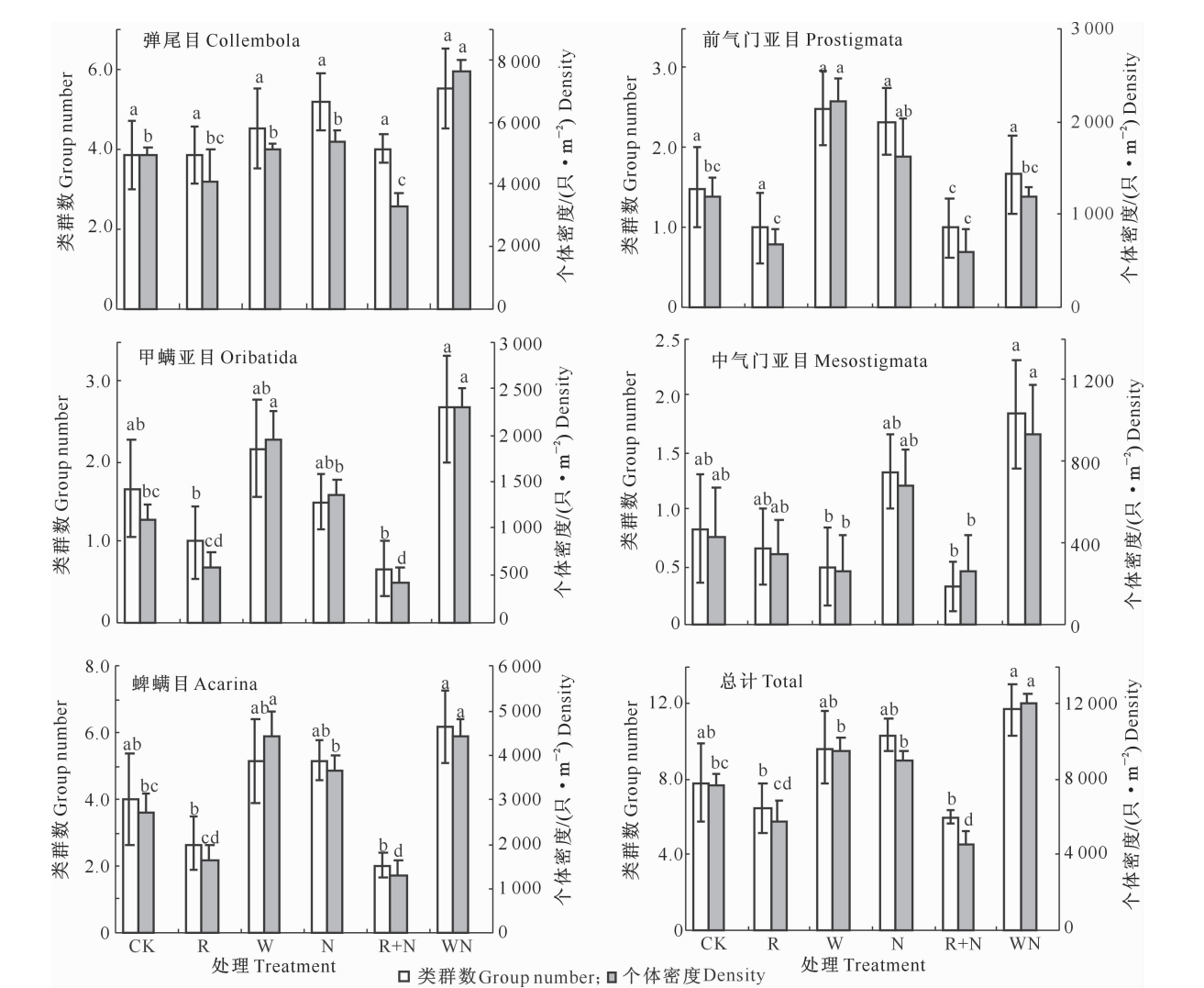
由表 1 可以看出,调查样地共分离得到中小型土壤动物 333 079.5 只/m²,其隶属于节肢动物门的 4 纲 10 目 47 科,其中弹尾纲占总个体密度的 54.74%,蛛形纲占总个体密度的 32.11%,昆虫纲占总个体密度的 12.84%,而唇足纲仅占总个体密度的 0.31%。优势类群为疣蟧科和等节蟧科,其个体密度分别占总个体密度的 15.60%和 11.01%;常见类群有长角蟧科、棘蟧科、鳞跳科、跳虫科、球角蟧科、圆蟧科、短角蟧科、小赫甲蟧科、单翼甲蟧科、礼服甲蟧科、上罗甲蟧科、洼甲蟧科、阿斯加甲蟧科、绒蟧科、隐颚蟧科、大赤蟧科、矮蒲蟧科、吸蟧科、跗线蟧科、表刻蟧科、寄蟧科、鼻蜱科、木蜱科、管蓟马科、缨甲科幼虫和蚁科,共 26 个类群,其个体密度占总个体密度的 62.39%。优势类群和常见类群个

体密度占总个体密度的 88.99%,其余 19 个类群为稀有类群,其个体密度仅占总个体密度的 11.01%。由此可见,中小型土壤动物优势类群和常见类群构成研究样地土壤动物群落的主体。

荒漠草原的气候与植被决定着中小型土壤动物的个体密度与类群数,水氮交互处理下中小型土壤动物个体密度最大。荒漠草原的主要控制因素之一为水分,因此水分控制对荒漠草原土壤动物群落组成具有一定影响。从表 1 可知,中小型土壤动物个体密度大小依次为:WN>W>N>CK>R>R+N。

2.2 水氮控制对中小型土壤动物群落的影响

水氮控制对中小型土壤动物群落的影响结果见图 1。



图柱上不同小写字母表示各处理有显著差异($P<0.05$)

Difference lowercase letters indicate significant difference in density or group richness among treatments ($P<0.05$)

图 1 水氮控制对中小型土壤动物群落的影响

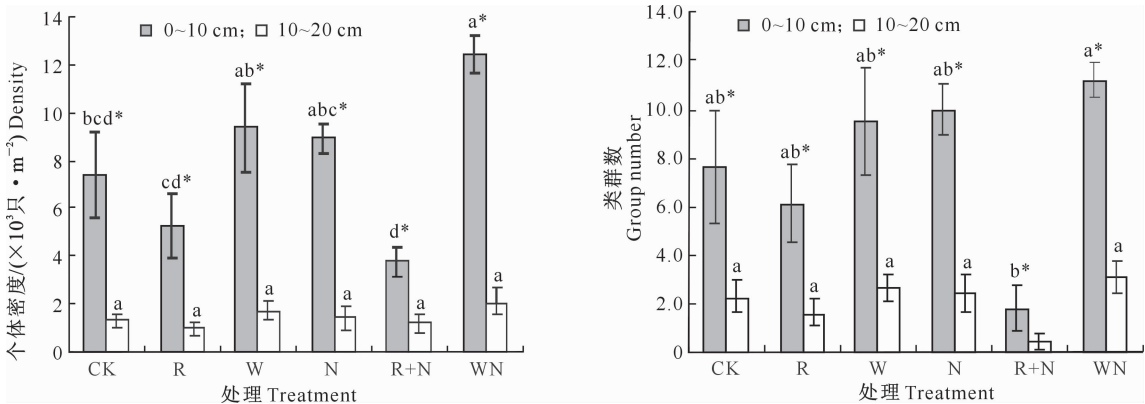
Fig. 1 Effect of water and N treatment on soil meso- and micro-fauna communities

控制降雨和施氮对荒漠草原中小型土壤动物个体密度和类群数都产生了较大影响。由图 1 可知,与 CK 相比,R 处理后弹尾目、前气门亚目、中气门亚目、甲螨亚目、蜚螨目个体密度和类群数均减少,但未达到显著水平($P>0.05$);W 处理增加了弹尾目、前气门亚目、甲螨亚目、蜚螨目总个体密度和类群数,其中前气门亚目、甲螨亚目和蜚螨目个体密度显著增加($P<0.05$),而中气门亚目个体密度和类群数则减少;N 处理弹尾目、前气门亚目、中气门亚目、蜚螨目个体密度和类群数均增加,但无显著差异($P>0.05$),而甲螨亚目个体密度增加,类群数减少,无显著变化($P>0.05$);R+N 处理弹尾目、前气门亚目、中气门亚目、甲螨亚目、蜚螨目个体密度和

类群数均减少,WN 处理下则增多,其中弹尾目、甲螨亚目、蜚螨目个体密度变化显著,说明水氮互作处理下中小型土壤动物个体密度变化显著($P<0.05$),类群数变化不明显($P>0.05$)。整体来看,增雨或施氮有利于中小型土壤动物个体密度的增加,但效果没有水氮互作明显。

2.3 水氮控制下中小型土壤动物表层个体密度及类群变化

由图 2 可知,中小型土壤动物在土层中的垂直分布表现出明显表聚性特点,各处理 0~10 cm 土层中小型土壤动物个体密度和类群数均高于 10~20 cm 土层。这可能是由于表层土壤疏松、通气性好,导致多数土壤动物栖息在表层土壤中。



不同小写字母表示各处理间同一指标有显著差异($P<0.05$);
* 表示同一处理 0~10 cm 和 10~20 cm 间同一指标有显著差异($P<0.05$)
Difference lowercase letters indicate significant difference in density or group riches between treatments;
* indicates significant difference in density or group riches between 0~10 cm and 10~20 cm

图 2 水氮控制下中小型土壤动物个体密度及类群数的变化

Fig. 2 Change in density and group richness of soil meso- and micro-fauna under water and nitrogen treatment

2.4 水氮控制下中小型土壤动物个体密度与土壤含水量的月动态变化

由图 3 和图 4 可以看出,土壤含水量与中小型土壤动物活动具有一定关联性,各处理土壤含水量

在 8 月份达到最大值;同时除 R 处理外,其余处理中小型土壤动物个体密度也在 8 月份达到最多,而 R 处理中小型土壤动物个体密度在 9 月份达到最大值。

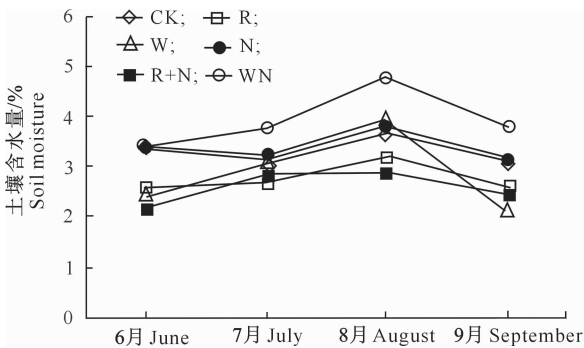


图 3 水氮控制下土壤含水量月动态变化

Fig. 3 Monthly changes of soil moisture under water and nitrogen treatment

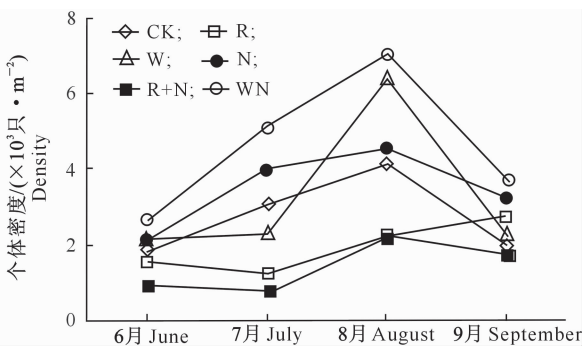


图 4 水氮控制下中小型土壤动物个体密度月动态变化

Fig. 4 Monthly changes of soil meso fauna density under water and nitrogen treatment

2.5 水氮控制下土壤环境参数的变化

由表 2 可知,野外自然条件下荒漠草原控制性降雨和施氮后,土壤环境发生了较大改变。水氮交互处理下土壤铵态氮、有机质、pH、含水量和植被盖度均发生了显著变化。N 处理下铵态氮含量显著高

于 CK 处理($P<0.05$),W 处理下土壤有机质含量显著高于 CK 处理($P<0.05$),R+N 处理显著降低了铵态氮含量($P<0.05$)。WN 处理显著提高了地上、地下生物量,W 处理显著提高了地上生物量,R 处理和 N 处理显著降低了地上生物量。

表 2 水氮控制下土壤环境参数的变化
Table 2 Environmental parameters under water and N treatment on soil

处理 Treatment	铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) NH_4^+-N	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) OM	pH	土壤含水量/% Soil moisture	植被盖度/% Coverage	地上生物量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Above-ground biomass	地下生物量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Below-ground biomass
CK	2.40±0.26 bc	23.68±0.84 bc	8.23±0.06 a	3.33±0.12 bc	15.83±1.21 b	1 836.47±88.34 b	34.18±3.88 bc
R	2.33±0.30 bcd	22.05±0.79 cd	8.23±0.07 a	2.78±0.13 cd	15.13±0.72 b	1 339.07±94.38 c	27.28±7.21 c
W	2.06±0.09 cd	25.91±0.24 a	8.27±0.09 a	2.94±0.27 bcd	15.75±0.87 b	2 214.93±76.60 a	51.07±7.29 ab
N	4.56±0.36 a	25.34±0.73 ab	8.17±0.10 a	3.42±0.18 ab	16.00±0.70 b	1 476.20±104.38 c	37.95±8.88 abc
R+N	1.50±0.10 d	20.77±0.39 d	8.42±0.04 a	2.61±0.10 d	13.75±0.82 b	1 763.80±94.42 b	23.93±2.44 c
WN	3.16±0.18 b	26.06±0.06 a	7.78±0.21 b	3.93±0.24 a	18.67±0.27 a	2 098.75±74.26 a	57.33±6.83 a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.6 中小型土壤动物群落与土壤养分和植被盖度的相关性

为了解控制性降雨和施氮对中小型土壤动物分布的作用机理,分析了中小型土壤动物群落特征与土壤环境因子以及植被盖度的关系,结果见表 3。由表 3 可知,中气门亚目类群数与铵态氮呈显著正相关关系($P<0.05$);前气门亚目、甲螨亚目个体密度和类群数均与有机质表现显著或极显著正相关;前气门亚目个体密度和类群数与地下生物量表现显著或极显著相关关系;甲螨亚目个体密度和类群数

与地上生物量有极显著相关关系,其个体密度与地下生物量是显著相关;弹尾目个体密度与有机质、植被盖度、地上生物量和地下生物量呈显著或极显著相关关系;土壤含水量与弹尾目、甲螨亚目和中气门亚目的个体密度呈显著相关关系;中气门亚目个体密度和类群数与植被盖度呈极显著相关;甲螨亚目个体密度和类群数与 pH 呈显著负相关关系($P<0.05$)。由此可见,中小型土壤动物与所生存环境的变化有着紧密联系。

表 3 水氮控制下土壤动物群落与土壤养分和植被盖度的相关性

Table 3 Correlations between soil fauna community and vegetation as well as soil nutrients under water and N treatment								
指标 Item	动物类群 Animal group	铵态氮 NH_4^+-N	有机质 OM	pH	土壤含水量 Soil moisture	植被盖度 Coverage	地上生物量 Above-ground biomass	地下生物量 Below-ground biomass
个体 密度 Density	弹尾目 Collembola	0.316 6	0.455 0**	-0.575 7*	0.422 1*	0.471 7**	0.409 8*	0.547 1**
	前气门亚目 Prostigmata	0.246 5	0.367 8*	-0.060 1	-0.022 5	0.086 5	0.320 4	0.387 1*
	甲螨亚目 Oribatida	0.216 7	0.651 5**	-0.440 2**	0.357 7*	0.327 0	0.479 3**	0.391 9*
	中气门亚目 Mtaesostigma	0.328 5	0.077 5	-0.169 8	0.339 6*	0.459 9**	-0.016 1	0.179 6
类群数 Group number	弹尾目 Collembola	0.189 3	0.222 4	-0.218 8	0.124 2	0.118 0	0.242 1	0.272 5
	前气门亚目 Prostigmata	0.317 9	0.357 7*	-0.093 1	-0.279 5	0.050 6	0.229 5	0.448 5**
	甲螨亚目 Oribatida	0.095 6	0.393 7*	-0.329 7*	0.086 7	0.365 8*	0.442 0**	0.268 7
	中气门亚目 Mtaesostigma	0.358 2*	0.125 5	-0.188 3	0.400 8*	0.483 2**	-0.010 6	0.212 0

注: * 表示差异显著($P<0.05$); * * 表示差异极显著($P<0.01$)。
Note: * indicates significant difference ($P<0.05$) ; * * indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

3 讨 论

3.1 控制性降雨对中小型土壤动物群落的影响

荒漠草原群落结构稳定性差,易受外界干扰。

降水量是影响土壤含水量的重要因素,而土壤含水量直接影响土壤动物的区系、组成,并且主要对甲螨、弹尾类等的分布影响较大^[23]。本研究结果显示,增雨对甲螨亚目和前气门亚目影响较大,而对弹

尾目影响较小。Blankinship 等^[24]研究发现,降水对土壤动物具有积极影响,且这种积极影响随处理时间的延长而加强。干旱对土壤动物多样性产生不利影响,干旱降低螨类的数量和多样性,而灌溉增加其数量和多样性,不同生态系统类型对降水格局改变的响应也不同^[24-27]。本研究中,增雨对中小型土壤动物有一定促进作用,而减雨对中小型土壤动物群落有负面影响,这是因为降水量的增加促成了有利于中小型土壤动物生长的土壤环境和植被盖度及生物量。

3.2 添加氮素对中小型土壤动物群落的影响

由于大多数土壤动物体积微小、活动能力差,氮沉降物绝大部分最终将进入土壤,势必对土壤动物的种类、数量、群落组成、多样性及生态功能造成很大影响^[28]。N 沉降对土壤动物的影响也存在复杂的互动机制,它受地理条件、植被、土壤状况和 N 沉降浓度等诸因素的影响。一般认为,植被盖度和密度越大、枯枝落叶层厚、土壤有机质丰富、土壤动物数量也就越多^[29-30]。氮沉降对土壤动物的影响研究也发现,一定限度内的氮沉降对生物可能是有利的,但过量的氮沉降则会造成负面影响^[31-32]。本研究仅进行施肥量为纯氮 10 g/m² 处理,结果表现为施氮提高土壤动物个体密度,有利于土壤动物活性。Boxman 等^[33]研究认为,铵态氮含量较低时弹尾目昆虫的多样性达到最高,而本研究结果表明弹尾目个体密度与铵态氮含量呈正相关关系,这可能是由于施氮在显著提高铵态氮含量的同时,也提高了土壤的有机质含量和植被盖度。施氮处理通过改变土壤环境,进而增加了中小型土壤动物个体密度,但未呈现出显著效果。

3.3 水氮交互作用对中小型土壤动物群落的影响

本研究结果发现,只有水氮交互作用下中小型土壤动物个体密度有显著变化($P < 0.05$)。表明水氮交互比单施氮肥或水分控制对中小型土壤动物群落的影响效果更为明显。水氮交互(增雨施氮)处理显著提高了铵态氮含量、有机质含量、土壤含水量、植被盖度及生物量,降低了土壤 pH 值,满足土壤动物生长发育需要,还能为中小型土壤动物提供食物和适宜的栖息环境。有研究发现,土壤 pH 值下降导致土壤动物无法生存,土壤酸化会使土壤动物数量减少,代谢衰弱以及生长繁殖能力减退^[34-35],但本研究 pH 值虽然显著降低,但并未使土壤环境酸化,pH 为 7.78,适宜中小型土壤动物生活,增加其个体密度及类群数。邵元虎等^[36]研究发现,土壤动物对

地上植物具有重要影响;郑经鸿等^[37]研究发现,土壤甲螨的分布与生态环境密切相关。本研究中甲螨亚目个体密度与土壤有机质、土壤 pH 值、土壤含水量及地上、地下生物量等均呈显著相关。

4 结 论

(1) 2014 年 6—9 月在内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗短花针茅荒漠草原共捕获中小型土壤动物 333 079.5 只/m²,其隶属于节肢动物门的 4 纲 10 目 47 科,主要为弹尾纲(Collembola)、蛛形纲(Arachnida)和昆虫纲(Insecta)。优势类群为疣蟧科(Neanridae)和等节蟧科(Isotomidae),优势类群和常见类群构成了研究样地中小型土壤动物群落的主体。

(2) 增雨、增雨施氮有助于提高短花针茅荒漠草原中小型土壤动物个体密度,减雨、减雨施氮处理减少中小型土壤动物个体密度,且水氮交互作用对中小型土壤动物个体密度影响表现显著。

(3) 短花针茅荒漠草原中小型土壤动物在土层的垂直分布中具有明显的表聚特性。

(4) 水氮交互处理显著增加中小型土壤动物个体密度,而对类群数无显著影响。

【参考文献】

- [1] 朱立安,魏秀国.土壤动物群落研究进展[J].生态科学,2007,26(3):269-273.
Zhu L A, Wei X G. Research progress on soil fauna community [J]. Ecological Science, 2007, 26(3): 269-273.
- [2] 吴廷娟.全球变化对土壤动物多样性的影响[J].应用生态学报,2013,24(2):581-588.
Wu T J. Effects of global change on soil fauna diversity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 581-588.
- [3] 沈 果.放牧和季节对锡林郭勒草原干生中小型土壤动物群落的影响[D].郑州:郑州大学,2011.
Shen G. Effect of grazing and seasons on meso-micro fauna community of Xilingol grassland Inner Mongolia [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [4] 肖辉林,卓慕宁,万洪富.大气 N 沉降的不断增加对森林生态系统的影响[J].应用生态学报,1996,7(S1):110-116.
Xiao H L, Zhuo M N, Wan H F. Effect of increased deposition of atmospheric nitrogen on forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(S1): 110-116.
- [5] Zheng X, Fu C, Xu X, et al. The Asian nitrogen cycle case study [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 79-87.
- [6] 徐国良,莫江明,周国逸,等.模拟氮沉降对苗圃地土壤动物群落的影响[J].生态环境,2004,13(4):487-492.
Xu G L, Mo J M, Zhou G Y, et al. Responses of soil fauna com-

- munity to simulated N deposition [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 487-492.
- [7] 李德军,莫江明,方运霆,等. 氮沉降对森林植物的影响 [J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- Li D J, Mo J M, Fang Y T, et al. Effects of nitrogen deposition on forest plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [8] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, et al. Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 1996, 6(3): 806-814.
- [9] 徐国良,莫江明,周国逸,等. 土壤动物与 N 素循环及对 N 沉降的响应 [J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2453-2463.
- Xu G L, Mo J M, Zhou G Y, et al. Relationship of soil fauna and N cycling and its response to N deposition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2453-2463.
- [10] 徐国良,莫江明,周国逸. 氮沉降对三种林型土壤动物群落生物量的影响 [J]. *动物学研究*, 2005, 26(6): 609-615.
- Xu G L, Mo J M, Zhou G Y. Responses of soil fauna biomass to N deposition in three forests in subtropical China [J]. *Zoological Research*, 2005, 26(6): 609-615.
- [11] Bergkvist B O, Folkeson L. Soil acidification and element fluxes of a fagus sylvatica forest as influenced by simulated nitrogen deposition [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1992, 65(1/2): 111-133.
- [12] 徐国良,莫江明, Brown S, 等. 土壤动物对模拟 N 沉降的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2245-2251.
- Xu G L, Mo J M, Brown S, et al. Effects of simulated N deposition on soil fauna [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2245-2251.
- [13] 黄建平,季明霞,刘玉芝,等. 干旱半干旱区气候变化研究综述 [J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 9-14.
- Huang J P, Ji M X, Liu Y Z, et al. An overview of arid and semi-arid climate change [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(1): 9-14.
- [14] McCarthy J J. Climate change 2001 impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2001: 1-18.
- [15] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change [J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [16] 刘任涛,朱 凡,陈 林. 降雨增加对沙质草地土壤温度的影响 [J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 348-354.
- Liu R T, Zhu F, Chen L. Effects of stimulated summer rainfall increases on soil temperature in Sandy Grassland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2): 348-354.
- [17] 牛书丽,万师强,马克平. 陆地生态系统及生物多样性对气候变化的适应与减缓 [J]. *中国科学院院刊*, 2009, 24(4): 421-427.
- Niu S L, Wan S Q, Ma K P. Acclimation and mitigation of terrestrial ecosystem and biodiversity to climate change [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2009, 24(4): 421-427.
- [18] Guo K U N, Hao S H U G, Sun O J, et al. Differential responses to warming and increased precipitation among three contrasting grasshopper species [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2539-2548.
- [19] 刘任涛. 荒漠草原土壤动物与降雨关系研究现状 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 760-765.
- Liu R T. Relationship between soil fauna and rainfall change in desert steppe [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 760-765.
- [20] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Yin W Y. China pictorial keys to soil animals [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [21] Xin W D, Yin X Q, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen Sandy Lands in northeastern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 77: 90-95.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [23] 钱复生,张光生. 安徽省休屯盆地土壤动物群落研究 [J]. *国土与自然资源研究*, 1995(2): 43-48.
- Qian F S, Zhang G S. Research on soil animal community in Xiutun basin, Anhui province [J]. *Territory Natural Resources Study*, 1995(2): 43-48.
- [24] Blankinship J C, Niklaus P A, Hungate B A. A meta-analysis of responses of soil biota to global change [J]. *Oecologia*, 2011, 165(3): 553-565.
- [25] Landesman W J, Treonis A M, Dighton J. Effects of a one-year rainfall manipulation on soil nematode abundances and community composition [J]. *Pedobiologia*, 2011, 54(2): 87-91.
- [26] Lindberg N, Bengtsson J. Population responses of oribatid mites and collembolans after drought [J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(2): 163-174.
- [27] Kardol P, Wardle D A. How understanding aboveground-belowground linkages can assist restoration ecology [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(11): 670-679.
- [28] Lawton J H, Bignell D E, Bloemers G F, et al. Carbon flux and diversity of nematodes and termites in cameroon forest soils [J]. *Biodiversity & Conservation*, 1996, 5(2): 261-273.
- [29] 张雪萍,李春艳,殷秀琴,等. 不同使用方式林地的土壤动物与土壤营养元素的关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(1): 26-31.
- Zhang X P, Li C Y, Yin X Q, et al. Relation between soil animal and nutrients in the differently used forest lands [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1999, 5(1): 26-31.
- [30] 张秀娟,勾影波,杨晨利. 东洞庭湖环湖丘岗区土壤动物群落多样性研究 [J]. *湖南理工学院学报(自然科学版)*, 2008, 21(1): 73-77.
- Zhang X J, Gou Y B, Yang C L. Soil animal community diver-

- sity in the hilly areas around east Dongting Lake [J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2008, 21(1): 73-77.
- [31] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, et al. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems [J]. Bio Science, 1989, 39(6): 378-386.
- [32] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, et al. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests [J]. Ecosystems, 2000, 3(3): 238-253.
- [33] Boxman A W, Dam D, Dijk H F G, et al. Ecosystem responses to reduced nitrogen and sulphur inputs into two coniferous forest stands in the Netherlands [J]. Forest Ecology and Management, 1995, 71(1): 7-29.
- [34] Xu G L, Schleppi P, Li M H, et al. Negative responses of collembole in a forest soil (Alptal, Switzerland) under experimentally increased N deposition [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(7): 2030-2036.
- [35] Stevens C J, Manning P, Berg L J, et al. Ecosystem responses to reduced and oxidised nitrogen inputs in European terrestrial habitats [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(3): 665-676.
- [36] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能 [J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6614-6625.
- Shao Y H, Zhang W X, Liu S J, et al. Diversity and function of soil fauna [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [37] 郑经鸿, 王丽真, 张兴亚, 等. 新疆草地甲螨分布规律研究 [J]. 生态学报, 1993, 13(2): 171-176.
- Zheng J H, Wang L Z, Zhang X Y, et al. Regularity of the distribution of *Oribotritia* Jacot in Xinjiang grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13(2): 171-176.
- (上接第 74 页)
- [20] 李文斌. 水稻体内硅的生理功能及沉积机理的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Li W B. Research on the physiological functions and deposition mechanisms of silicon in rice [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [21] 董 鹤. 玉米叶表皮短细胞发育过程的形态特征及短细胞作用研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- Dong H. Research on the morphological characteristics related to the development process and the function of short cells in epidermis of maize [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [22] 杨秉耀, 陈新芳, 刘向东, 等. 水稻不同品种叶表面硅质细胞的扫描电镜观察 [J]. 电子显微学报, 2016(4): 152-160.
- Yang B Y, Chen X F, Liu X D, et al. Observation of silicon cells on the leaf surface in different varieties of rice [J]. Journal of Electronic Microscopy, 2016(4): 152-160.
- [23] 王爱华, 彭镇化, 孙启祥. 生物矿化与植物体内的生物硅化 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 63-66.
- Wang A H, Peng Z H, Sun Q X. Biomineralization and silicification in plant biological [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(5): 63-66.
- [24] Motomura H, Fujii T, Suzuki M. Silica deposition in relation to ageing of leaf tissue in *Sasa veitchii* (Carrere) Rehder (Poaceae: Bambusoideae) [J]. Annals of Botany, 2004, 93(3): 235-248.
- [25] Motomura H, Fujii T, Suzuki M. Distribution of silicified cells in the leaf blades of *Pleiolasrus chino* (Franchet et Savatier) Makino (Bambusoideae) [J]. Annals of Botany, 2000, 85: 751-757.
- [26] 李 泉, 徐德克, 吕厚远. 竹亚科植硅体形态学研究及其生态学意义 [J]. 第四季研究, 2005, 25(6): 777-784.
- Li Q, Xu D K, Lü H Y. Morphology of phytolith in bambusoideae (Gramineae) and its ecological significance [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(6): 777-784.
- [27] 腰希申, 马乃训, 王宇飞, 等. 中国竹材结构图谱 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- Yao X S, Ma N X, Wang Y F, et al. Bamboo culm anatomy of China [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [28] GB/T 15780—1995 竹材物理力学性质试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- GB/T 15780—1995 Test method of physical and mechanical properties of bamboo [S]. Beijing: China Standard Press, 1995.
- [29] 陈昌斌, 倪 兵, 徐寿彭, 等. 凤尾竹硅酸体形态及其发生初探 [J]. 植物研究, 2003, 23(4): 424-432.
- Chen C B, Ni B, Xu S P, et al. On morphology and morphogenesis of silica bodies in *Bambusa multlex* var. NANA [J]. Bulletin Botanical Research, 2003, 23(4): 424-432.
- [30] Yan S G, Hong Y L, Han L W, et al. Phytoliths as a method of identification for three genera of woody bamboos (*Bambusoideae*) in tropical southwest China [J]. Journal of Archaeological Science, 2016(68): 46-53.
- [31] 牛兆辉, 何文志. 龙竹竹秆植硅体形态变化研究 [J]. 竹子学报, 2016, 35(3): 9-14, 25.
- Niu Z H, He W Z. The Changes in phytolith morphology in Culms of *Dendrocalamus giganteus* [J]. Journal of Bamboo Science, 2016, 35(3): 9-14, 25.
- [32] 周 崑, 姜笑梅. 中国裸子植物材的木材解剖学及超微构造 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1994.
- Zhou Y, Jiang X M. Wood anatomy and ultrastructure of gymnospermous woods in China [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1994.
- [33] Jones L H P, Handreck K A. Silica in soils plants and animals [J]. Advances in Agronomy, 1967, 19: 107-149.