•研究报告•

三江平原土壤动物群落多样性对CO₂浓度升高的响应

伍一宁^{1,2} 王 贺¹ 钟海秀² 许 楠²
李金博² 王继丰² 倪红伟^{2*} 邹红菲^{1*}

1 (东北林业大学野生动物资源学院, 哈尔滨 150040)

2 (黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨 150040)

摘要: 为研究大气CO₂浓度升高条件下土壤动物的响应, 本文采用开顶式气室(OTC)控制大气CO₂浓度, 设置了3个梯度, 分别为低浓度370 ppm背景CO₂ (AC)、中浓度550 ppm CO₂ (EC1)和高浓度700 ppm CO₂ (EC2)。于2017年秋季取样并用改良Tullgren干漏斗法和Baermann湿漏斗分离土壤动物。结果表明: (1)共捕获土壤动物6,268头, 隶属于7纲15目, 优势类群为甲螨亚目, 占捕获量的88.13%; 常见类群为弹尾目和双翅目幼虫, 合计占捕获量的9%。不同CO₂浓度水平下, 优势类群(甲螨亚目)和常见类群(弹尾目、双翅目幼虫)相同, 但是稀有类群存在一定差异。(2)CO₂浓度升高显著增加了甲螨亚目的类群数和个体密度, 显著降低了弹尾目的类群数和个体密度, 对其他土壤动物无显著影响。(3)三江平原不同浓度条件下土壤动物的Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数均为AC > EC1 > EC2, 而优势度指数为EC2 > EC1 > AC, 丰富度指数为AC > EC2 > EC1。研究表明, 气候变化有可能影响土壤动物的群落结构以及土壤动物的多样性。

关键词: 三江平原; 土壤动物; CO₂浓度升高; 生物多样性

The response of diverse soil fauna communities to elevated CO₂ concentrations in Sanjiang Plain

Yining Wu^{1,2}, He Wang¹, Haixiu Zhong², Nan Xu², Jinbo Li², Jifeng Wang², Hongwei Ni^{2*}, Hongfei Zou^{1*}

1 College of Wildlife Resources, Northeast Forestry University, Harbin 150040

2 Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040

Abstract: The effect of elevated atmospheric CO₂ concentrations was investigated on soil fauna communities, controlling the concentrations at 370, 550 and 700 ppm in open top chambers in Sanjiang Plain. Samples were taken and separated by Tullgren or Baermann funnel methods in autumn 2017. Our results showed that: (1) 6,268 individuals belonging to seven classes and 15 orders were collected. Oribatida was the dominant group, accounting for 88.13% of the total individuals. Collembola and Diptera larvae were the other most common groups, accounting for 9% in total, respectively. Different groups varied in their responses to elevated CO₂ concentrations. Oribatida was the dominant group. Collembola and Diptera larvae were the most common groups in AC, EC1 and EC2, but rare groups also differed in AC, EC1 and EC2. (2) The elevated CO₂ concentration significantly increased the density of Oribatida, but reduced the density of Collembola. However, no other soil fauna were significantly affected. (3) The Shannon-Wiener index and the Pielou index of soil fauna exhibited the order of AC > EC1 > EC2, the Simpson index showed the order of EC2 > EC1 > AC, and the Margalef index showed the order of AC > EC2 > EC1. Our results indicate that the soil fauna community composition and diversity might be affected by climate change.

Key words: Sanjiang Plain; soil fauna; elevated CO₂ concentration; biodiversity

收稿日期: 2018-03-19; 接受日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(31500323, 31370426)和黑龙江省科学院青年创新基金(CXMS2018ZR01)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: nihongwei2000@163.com, hongfeizou@163.com

土壤动物群落是陆地生态系统中重要的组成部分,不仅种类数量多且分布广泛,也是对环境最为敏感的类群之一。土壤动物的多样性对维持稳定的土壤生态系统及其物质循环和能量流动起着不可替代的作用(Bardgett & Wardle, 2010; 邵元虎等, 2015)。气候变化对环境产生的效应主要取决于地下生态系统对环境的响应(Kardol et al, 2011),而土壤动物群落作为生态系统功能的重要驱动因子又是地下生态系统的重要组成部分(Heemsbergen et al, 2004),因此研究土壤动物多样性对全球变化的响应是保护并维持生态系统功能稳定性的关键。

目前大气中的CO₂浓度显著上升。其变化速率远高于42万年前的任一时刻的CO₂浓度升高速率(朴世龙等, 2010),持续升高的CO₂浓度将不可避免地影响地上植被的初级生产力,并间接影响地下生态系统的功能多样性、土壤动物以及土壤微生物群落的多样性(Bever, 2003; Bartelt-Ryser et al, 2005),这种变化不仅对陆地生态环境产生显著影响(孙良杰等, 2012),更直接影响了全球碳循环的时空格局(Arora et al, 2009, 2013; Cox et al, 2013)。国内外许多试验表明土壤动物及其多样性对全球变化尤其是大气CO₂浓度升高能够产生正向、中性和负向的响应(Wardle et al, 1998)。目前,关于CO₂浓度升高对三江平原湿地生态系统的影响已经做了大量研究,如植物生理生态的变化、土壤微生物的变化等方面,但是对于土壤动物还缺乏深入的研究,而三江平原是我国面积最大、分布最集中的沼泽分布区,且是具有重要代表性和国际意义的湿地生态系统。本研究以三江平原湿地土壤动物为主要研究对象,以期揭示土壤动物对CO₂浓度升高的响应机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于黑龙江省科学院自然与生态研究所三江平原湿地生态定位研究站,该研究站在三江平原东北部的洪河国家级自然保护区内,保护区地理坐标47°42'1"–47°52'00" N, 133°34'38"–133°46'29" E。试验地位于三江平原东北部,年均降水量585 mm,主要集中在7–9月,占全年降水的60%以上,蒸发量1,166 mm,年均气温1.9℃,无霜期114–150天。试验区土壤主要有沼泽土、白浆土和泛滥地,代表性植

被类型是以小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)、狭叶甜茅(*Glyceria spiculosa*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)为优势植物的草甸和沼泽(倪红伟和李君, 1999)。

1.2 采样方法

实施方法: 本实验采用OTC-1型开顶式气室,钢瓶装液态纯CO₂,经支转子流量计定量后由鼓风机送入气室内,在整个生长季保持连续通气,充气时间为6:00–18:00,雨天停止充气。实验设置3个CO₂浓度处理,每个处理重复3次,即9个气室:气室1–3为低浓度,370 ppm背景CO₂(AC);气室4–6为中浓度,550 ppm CO₂(EC1);气室7–9为高浓度,700 ppm CO₂(EC2)。

取样及处理: 2017年秋季,采用土壤采样器,在每个采样点采集15 cm × 15 cm × 15 cm的土壤带回实验室,采用改良干漏斗法(Tullgren)对土壤动物进行分离,土壤动物收集在75%的乙醇溶液中。湿生土壤动物在湿地生态系统中至关重要,且湿生土壤动物移动较慢,因此采用湿漏斗(Baermann)进行分离。分离所得的土壤动物采用多功能变焦显微镜Nikon AZ100和体视显微镜Olympus SZX7观察,参考《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英, 1998)和《中国亚热带土壤动物》(尹文英, 1992)进行分类鉴定,并统计数量。根据不同土壤动物类群在群落总数量中所占比例,将中小型土壤动物划分为优势类群(> 10%),常见类群(1–10%)和稀有类群(< 1%)。

1.3 数据分析

所有试验数据统计分析均在Excel 2016和SPSS 20.0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,并用Origin 9.0绘制图表。采用如下公式对调查获得的土壤动物群落多样性进行分析(马克平和刘玉明, 1994)。

Shannon-Wiener多样性指数:

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

$$\text{Pielou均匀度指数: } E = H' / \ln S \quad (2)$$

$$\text{Simpson优势度指数: } C = \sum P_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Margalef丰富度指数: } D = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

式中, N 为群落中所有种类的个体总数, S 为群落类群数, $P_i = n_i / N$, 为第 i 个类群的多度比。

2 结果

2.1 土壤动物群落组成

调查样地共捕获土壤动物17个类群6,268头,隶属于7纲15目(表1),其中甲螨亚目占总捕获量的88.13%,为优势类群;双翅目幼虫和弹尾目为常见类群,合计占总捕获量的9.00%。鞘翅目幼虫、中气门亚目和线蚓科等14个类群为稀有类群,合计占总捕获量的2.76%。不同CO₂浓度下捕获的土壤动

表1 不同CO₂浓度处理下土壤动物群落组成和个体密度(ind./m²)。AC: 370 ppm CO₂; EC1: 550 ppm CO₂; EC2: 700 ppm CO₂。
Table 1 Soil fauna communities and densities (ind./m²) under different CO₂ concentration. AC, 370 ppm CO₂; EC1, 550 ppm CO₂; EC2, 700 ppm CO₂.

	AC		EC1		EC2	
	密度 Density	优势度 Domi- nance	密度 Density	优势度 Domi- nance	密度 Density	优势度 Domi- nance
弹尾目 Collembola	7.98%	++	5.63%	++	2.53%	++
甲螨亚目 Oribatida	82.32%	+++	86.00%	+++	92.88%	+++
双翅目幼虫 Diptera larvae	6.63%	++	4.81%	++	2.28%	++
蜘蛛目 Araneae	0.06%	+	0.16%	+	0.14%	+
鞘翅目幼虫 Coleptera larvae	0.68%	+	0.55%	+	0.25%	+
同翅目 Homoptera	0.49%	+	0.27%	+	0.11%	+
线蚓科 Enchytraeidae	0.49%	+	0.38%	+	0.21%	+
原尾纲 Protura	0.06%	+	—	—	—	—
缨翅目 Thysanoptera	0.06%	+	—	—	0.04%	+
中气门亚目 Mesostigmata	0.80%	+	0.33%	+	0.11%	+
啮虫目 Psocoptera	0.06%	+	0.33%	+	0.14%	+
绒螨科 Trombidiformes	0.06%	+	0.16%	+	0.18%	+
线虫 Nemata	0.06%	+	0.16%	+	0.78%	+
鞘翅目成虫 Coleptera imago	0.18%	+	0.60%	+	0.28%	+
蜚蠊目 Blattoptera	0.06%	+	0.05%	+	0.04%	+
正蚓目 Lumbricida	—	—	—	—	0.04%	+
双翅目成虫 Diptera imago	—	—	0.55%	+	—	—

+++ 优势类群; ++ 常见类群; + 稀有类群; — 不存在。
+++ Dominant groups; ++ Common groups; + Rare groups; — None

物优势类群均是甲螨亚目;常见类群为双翅目幼虫和弹尾目;稀有类群存在差异:原尾纲仅在低浓度CO₂(AC)中出现,双翅目成虫仅在中浓度CO₂(EC1)中出现,正蚓目仅在高浓度CO₂(EC2)中出现。

2.2 CO₂浓度升高对土壤动物群落组成的影响

CO₂浓度升高对三江平原不同类群土壤动物产生的影响有所不同,尤其对于种类丰富数量众多的中型土壤动物,如甲螨类和弹尾目等。从图1看出,随CO₂浓度升高,甲螨亚目的类群数和个体密度也逐渐增加,在低浓度和中浓度间的差异未达到显著水平,但在中浓度和高浓度间差异显著($P < 0.05$),说明甲螨亚目对高浓度CO₂响应明显但对中浓度的CO₂浓度响应并不显著。弹尾目类群数随CO₂浓度升高而降低,在低浓度和中浓度以及中浓度和高浓度间差异均不显著($P > 0.05$),但低浓度和高浓度之间差异显著($P < 0.05$)。双翅目幼虫的类群数和个体密度随CO₂浓度升高而降低,但在三个浓度间均无显著差异($P > 0.05$)。总体来看,三江平原土壤动物的密度和类群数随CO₂浓度升高而升高。

大气CO₂浓度升高对不同类群的土壤动物影响不同,随CO₂浓度升高甲螨亚目、绒螨科、蜘蛛目、线虫类群数和密度升高,而弹尾目、双翅目幼虫、鞘翅目幼虫、同翅目、蜚蠊目的类群数和种群密度却下降。中气门亚目、啮虫目以及鞘翅目成虫均在中等CO₂浓度水平下类群数和种群密度达到最高。

2.3 土壤动物群落多样性比较

通过单因素方差分析可知,三江平原不同CO₂浓度处理下土壤动物群落多样性指数、均匀度指数均表现为低浓度CO₂与中浓度CO₂间无显著差异($P > 0.05$),但中浓度CO₂和高浓度CO₂间存在显著差异($P < 0.05$);而优势度指数表现为低浓度CO₂、中浓度CO₂和高浓度CO₂三者间均存在显著差异($P < 0.05$);丰富度指数表现为低浓度CO₂、中浓度CO₂和高浓度CO₂三者间均无显著差异($P > 0.05$)。Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数都是AC > EC1 > EC2,而优势度指数为EC2 > EC1 > AC,丰富度指数为AC > EC2 > EC1。其中低浓度CO₂中土壤动物的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数最大,高浓度CO₂的优势度指数最大,这说明三江平原低浓度CO₂处理下土壤动物最丰富、布局更多样化,高浓度CO₂处理下类群数量相对差异较大。

图1 三江平原不同CO₂浓度处理下土壤动物优势类群类群数和密度。AC: 370 ppm CO₂; EC1: 550 ppm CO₂; EC2: 700 ppm CO₂。不同小写字母表示不同处理之间个体密度或类群数有显著差异($P < 0.05$)。

Fig. 1 Effect of CO₂ concentration on soil fauna communities in Sanjiang Plain. AC, 370 ppm CO₂; EC1, 550 ppm CO₂; EC2, 700 ppm CO₂. Different lowercase letters indicate significant difference in density or group richness among treatments ($P < 0.05$).

图2 三江平原不同CO₂浓度处理下土壤动物群落的生态多样性指数(平均值 $\pm$ 标准差)。AC: 370 ppm CO₂; EC1: 550 ppm CO₂; EC2: 700 ppm CO₂。不同小写字母表示不同处理之间多样性指数有显著差异($P < 0.05$)。

Fig. 2 Diversity indices of soil fauna communities under different CO₂ concentration in Sanjiang Plain. AC, 370 ppm CO₂; EC1, 550 ppm CO₂; EC2, 700 ppm CO₂. Different lowercase letters indicate significant difference in diversity indices among treatments ($P < 0.05$).

方式来影响土壤动物多样性: 一是促进地上植物的生长进而改变凋落物和根系分泌物的化学组成(Field et al, 1995; Reich et al, 2001, 2006; Jones et al, 2009; Blagodatskaya et al, 2010), 尤其是碳氮比的增加(Drigo et al, 2010); 二是降低气孔导度和土壤温湿度(Field et al, 1995; Reich, 2009)。

本研究结果表明: (1)CO₂浓度升高对土壤动物个体密度和类群数具有显著影响。随着CO₂浓度的升高, 优势物种甲螨亚目的类群数和个体密度显著增加。这可能是由于植物的地上生物量和地下生物量随着CO₂浓度升高而增加, 且高CO₂浓度条件下微生物活性更大, 土壤动物获得更充足的食物资源, 因此高浓度CO₂更适宜甲螨亚目的生存。Okada等(2014)和Eisenhauer等(2012)研究均显示中小型土壤动物对CO₂浓度升高呈积极响应, 可能是由于CO₂可以作为一种“碳肥”, 刺激了植物的光合作用并提高了植物的生物量, 进而增加了土壤表层的有机物输入并为土壤动物提供了食物资源和营养生态位, 因此CO₂浓度升高对土壤动物的刺激作用可能是由于提高了初级生产力的原因(Blankinship et al,

3 讨论

有研究表明, 大气CO₂浓度升高主要通过两种

2011)。(2)弹尾目和双翅目幼虫随CO₂浓度升高而减少,说明高浓度CO₂可能对于弹尾目和双翅目幼虫造成消极影响。Loranger等(2004)和Xu等(2013)分别在美国和瑞士进行的FACE实验均发现随CO₂浓度升高弹尾目丰富度减少,这和本研究结果一致;但是,Sticht等(2006)在德国进行的FACE实验,发现弹尾目的丰富度和多样性随着CO₂浓度升高而增加。这是由于弹尾目是杂食性功能类群,对不同研究地的食物资源和气候条件响应不同,且CO₂浓度升高还会导致分解者对食物产生不同的选择(Frouz et al, 2002)。

本研究结果表明,土壤动物群落的多样性指数、均匀度指数在中浓度CO₂条件下的下降均不显著,但在高浓度CO₂处理下却显著下降。这可能是由于中浓度CO₂相较于低浓度CO₂植物生产力提升,土壤动物食源更丰富,并且食物资源充足的情况下,土壤动物捕食者数量增加,限制了被捕食者的竞争排斥,因此土壤动物多样性不会被竞争所影响。而高浓度CO₂相较于中浓度和低浓度CO₂可能远远超过了土壤动物群落整体的CO₂浓度适应阈值,因此土壤动物多样性明显降低。此外,优势度指数随CO₂浓度升高显著增加,这是由于不同的土壤动物有其自身的生物学和生活史特性,其类群和个体密度会随着环境条件变化而发生改变,并且CO₂浓度升高对土壤动物的影响还受气候、温度以及土壤环境因子等多因素的协同作用(Van Veen et al, 1991; D'Annibale, 2015),因此这也是土壤动物优势度指数增加的原因。

综上所述,CO₂浓度的升高会对土壤动物产生一系列影响,正向影响如CO₂浓度升高导致温度升高,进而直接影响土壤动物的生长繁殖等活动;负向影响会导致土壤动物夏季死亡率升高等(李琪和王朋, 2002)。由于土壤动物在生态系统养分循环中起着至关重要的作用,因此开展土壤动物营养级、食源以及食物网对CO₂浓度升高响应的研究有助于从土壤动物的角度揭示湿地生物群落对气候变化的响应机制。在未来的研究中更应关注于地上植物和地下生态系统包括土壤动物和土壤微生物之间反馈机制的研究,这将有助于更加深入了解CO₂浓度对于整个陆地生态系统的影响。

致谢: 特别感谢来自俄罗斯科学院谢韦尔佐夫生态

与进化研究所的Tiunov Alexei教授的指导以及Sergey Tsurikov和Vladislav Leonov在试验中的支持帮助。

参考文献

- Arora VK, Boer GJ, Christian JR, Curry CL, Denman KL, Zahariev K, Flato GM, Scinocca JF, Merryfield WJ, Lee WG (2009) The effect of terrestrial photosynthesis down regulation on the twentieth-century carbon budget simulated with the earth system model. *Journal of Climate*, 22, 6066–6088.
- Arora VK, Boer GJ, Friedlingstein P, Eby M, Jones CD, Christian JR, Bonan G, Bopp L, Brovkin V, Cadule P, Hajima T, Ilyina T (2013) Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth system models. *Journal of Climate*, 26, 5289–5314.
- Bardgett RD, Wardle DA (2010) *Aboveground-Belowground Linkages: Biotic Interactions, Ecosystem Processes and Global Change*. Oxford University Press, Oxford.
- Bartelt-Ryser J, Joshi J, Schmid B (2005) Soil feedbacks of plant diversity on soil microbial communities and subsequent plant growth. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 7, 27–49.
- Bever JD (2003) Soil community feedback and the coexistence of competitors: Conceptual frameworks and empirical tests. *New Phytologist*, 157, 465–473.
- Blagodatskaya E, Blagodatsky S, Dorodnikov M (2010) Elevated atmospheric CO₂ increases microbial growth rates in soil: Results of three CO₂ enrichment experiments. *Global Change Biology*, 16, 836–848.
- Blankinship JC, Niklaus PA, Hungate BA (2011) A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia*, 165, 553–565.
- Cox PM, Pearson D, Booth BB, Friedlingstein P, Huntingford C, Jones CD, Luke CM (2013) Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, 494, 341–344.
- D'Annibale A, Larsen T, Sechi V, Cortet J, Strandberg B, Vincze E, Filser J, Audisio PA, Krogh PH (2015) Influence of elevated CO₂ and GM barley on a soil mesofauna community in a mesocosm test system. *Soil Biology & Biochemistry*, 84, 127–136.
- Drigo B, Pijl AS, Duyts H (2010) Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 107, 10938–10942.
- Eisenhauer N, Cesarz S, Koller R, Worm K, Reich PB (2012) Global change belowground: Impacts of elevated CO₂, nitrogen, and summer drought on soil food webs and biodiversity. *Global Change Biology*, 18, 435–447.
- Field C, Jackson R, Mooney H (1995) Stomatal responses to increased CO₂: Implications from the plant to the global

scale. *Plant Cell and Environment*, 18, 1214–1225.

- Frouz J, Novakova A, Jones TH (2002) The potential effect of high atmospheric CO₂ on soil fungi-invertebrate interactions. *Global Change Biology*, 8, 339–344.
- Heemsbergen DA, Berg MP, Loreau M, Van Hal JR, Faber JH, Verhoef HA (2004) Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science*, 306, 1019–1020.
- Jones D, Nguyen C, Finlay R (2009) Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil–root interface. *Plant and Soil*, 321, 5–33.
- Li Q, Wang P (2002) Current situation and prospect of elevated atmospheric CO₂ effects on soil nematodes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 1349–1351. (in Chinese with English abstract) [李琪, 王朋 (2002) 开放式空气CO₂浓度增高对土壤线虫影响的研究现状与展望. *应用生态学报*, 13, 1349–1351.]
- Loranger GI, Pregitzer KS, King JS (2004) Elevated CO₂ and O₃ concentrations differentially affect selected groups of the fauna in temperate forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 1521–1524.
- Ma KP, Liu YM (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (Part 2). *Biodiversity Science*, 2, 231–239. (in Chinese) [马克平, 刘玉明 (1994) 生物群落多样性的测度方法. I. α 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 2, 231–239.]
- Ni HW, Li J (1999) *Biological Diversity in Honghe Nature Reserve*. Heilongjiang Scientific Press, Harbin. (in Chinese) [倪红伟, 李君 (1999) 洪河自然保护区生物多样性. 黑龙江科技出版社, 哈尔滨.]
- Okada H, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, Hasegawa T (2014) Elevated temperature has stronger effects on the soil food web of a flooded paddy than does CO₂. *Soil Biology & Biochemistry*, 70, 166–175.
- Piao SL, Fang JY, Huang Y (2010) The carbon balance of terrestrial ecosystem in China. *China Basic Science*, 12(2), 20–22, 65. (in Chinese with English abstract) [朴世龙, 方精云, 黄耀 (2010) 中国陆地生态系统碳收支. *中国基础科学*, 12(2), 20–22, 65.]
- Reich PB (2009) Elevated CO₂ reduces losses of plant diversity caused by nitrogen deposition. *Science*, 326, 1399–1402.
- Reich PB, Hobbie SE, Lee T (2006) Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response. *Nature*, 440, 922–925.
- Reich PB, Knops J, Tilman D (2001) Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition. *Nature*, 410, 809–810.
- Shao YH, Zhang WX, Liu SJ, Wang XL, Fu SL (2015) Diversity and function of soil fauna. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 6614–6625. (in Chinese with English abstract) [邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷 (2015) 土壤动物多样性及其生态功能. *生态学报*, 35, 6614–6625.]
- Sticht C, Schrader S, Giesemann A, Weigel HJ (2006) Effects of elevated atmospheric CO₂ and N fertilization on abundance, diversity and C-isotopic signature of collembolan communities in arable soil. *Applied Soil Ecology*, 34, 219–229.
- Sun LJ, Qi YC, Dong YS, Peng Q, He YT, Liu XC, Jia JQ, Cao CC (2012) Research progresses on the effects of global change on microbial community diversity of grassland soils. *Progress in Geography*, 31, 1715–1723. (in Chinese with English abstract) [孙良杰, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 何亚婷, 刘欣超, 贾军强, 曹丛丛 (2012) 全球变化对草地土壤微生物群落多样性的影响研究进展. *地理科学进展*, 31, 1715–1723.]
- Van Veen JA, Lijeroth E, Lekkerkerk LJA, Van DGSC (1991) Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO₂ levels. *Ecological Applications*, 1, 175–181.
- Wardle DA, Verboef HA, Clarholm M (1998) Tropic relationships in the soil microfood-web: Predicting the responses to a changing global environment. *Global Change Biology*, 4, 713–727.
- Xu GL, Fu SL, Schleppe P, Li MH (2013) Responses of soil Collembola to long-term atmospheric CO₂ enrichment in a mature temperate forest. *Environmental Pollution*, 173, 23–28.
- Yin WY (1992) *Subtropical Soil Animals of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尹文英 (1992) 中国亚热带土壤动物. 科学出版社, 北京.]
- Yin WY (1998) *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尹文英 (1998) 中国土壤动物检索图鉴. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 傅声雷 责任编辑: 闫文杰)