

研究的重点。研究表明,一般土壤动物都具有明显的表聚性,随着土层深度增加而递减,不同土壤类型中递减速率可能不同^[8,13],但在沙地、农业用地和过度放牧的草地中,土壤动物的垂直分布可能会出现逆向分布现象^[18,19],如科尔沁沙地中小型土壤动物线虫在 5~10 cm 深处分布最多,与一般表层 0~5 cm 密度最高明显不同^[19]。另外,季节变化对土壤动物的垂直分布也有重要影响;年际间的温度和湿度的变化通过对枯落物分解的影响来影响土壤动物垂直分布^[12]。

2.2 土壤动物影响因素

土壤动物作为土壤和整个生态系统的重要组成部分,在自身或与微生物互相作用发挥重要生态作用的同时,其生态特征、生态功能还受到其周围环境因素变化的影响。特别是随着全球气候变化、土地利用/覆被变化、土壤污染等问题研究的深入,土壤动物影响因素和土壤动物对外界条件变化的响应研究也成为土壤动物研究的重要内容。

2.2.1 自然因素

温度和湿度是影响土壤动物群落结构和功能的最主要的自然因素^[23,24],0 以下能够导致土壤动物死亡^[23]。不同纬度下,温度是影响土壤动物分布的主要环境因素。在同一地区,湿度能够强烈地影响某些土壤动物如弹尾目土壤动物的分布格局和功能。研究表明,弹尾目土壤动物受干旱环境因子的强烈胁迫;干旱条件对土壤动物的枯落物分解功能有显著影响,且枯落物分解后期比前期明显;土壤动物的活性和水分的可利用性密切相关^[25]。Silvan 等^[26]对芬兰南部连续排水的泥炭地中的中型土壤动物群落结构的变化进行了研究,发现排水和水面位的持续下降使得所研究的土壤动物数量增多;土壤动物的数量、结构与泥炭地水位密切相关。Raija 等^[27]在芬兰进行了类似的研究,发现水位变化的初期阶段,无论是水位上升还是下降,土壤动物的分布格局变化都很明显;当水位低于 20 cm 时,甲螨的分布变化很小,而弹尾目土壤动物的分布变化仍很明显。此外,土壤中有机质的性质、质量也是影响土壤动物功能的重要因素^[28]。

2.2.2 人为干扰因素

(1) 火烧。火生态因子对表聚性强和地表土壤动物直接致死作用明显;还可通过改变土壤理化性质、减少土壤有机质等间接作用影响土壤动物类群数量^[29]。火烧对不同生物群落的土壤动物影响不同,大中型土壤动物活动性强,在火烧过程中通过迁移活动以躲避焚烧和高温,而小型类群活动相对较弱,火烧中大部分死亡^[30]。火

烧后,土壤动物整体下移,表聚现象消失,出现逆向分布现象^[29~33]。Neumann 等^[31]和 Collett 等^[32,33]对火烧影响因子进行了各种不同的试验,发现火烧整体上使得土壤动物个体和类群数量都减少,群落组成、空间分布和多样性发生变化,但不同季节、不同频率、不同持续时间的火烧对土壤动物的影响明显不同。

(2) 放牧。放牧影响因子的研究多是采用不同放牧强度的对比研究方法^[34~36]。总体上,放牧对土壤动物短期内影响不明显,具有明显的滞后效应。但在持续放牧扰动下,土壤动物的类群数和个体数随放牧强度的增加而呈降低趋势^[34],且在土壤表层表现最为明显,土壤内部有时表现不出明显的差异^[36]。放牧条件下土壤动物密度、生物量、群落的多样性指数和均匀度指数波动较大,轻度、中度牧压下各土层土壤动物有不同程度的上升,过度放牧条件下明显下降^[35]。综合起来看,在中度放牧下土壤动物的多样性指数较大。土壤动物在土层中的垂直分布,以适度放牧的表聚性最为明显,而过度放牧则相反。

(3) 农药和肥料施用。农药对土壤动物的染毒实验表明,农药毒性对土壤动物呼吸强度具有明显的抑制作用,其呼吸代谢强度随农药处理浓度的增加与染毒历时的延长而减弱;高浓度、短时间或低浓度、长时间的染毒均能导致土壤动物死亡^[37]。农药能够明显导致土壤动物类群和数量的减少,动物种类的减少主要是常见种和稀有种类,动物数量变化则主要是优势类群的数量消长^[37,38]。但也有研究证明,不同的土壤动物类群对不同浓度的农药反应不同,土壤动物恢复的时间不同^[39]。

有机和化学肥料对土壤动物的影响不同。有机肥料通过增加有机质、细菌和真菌的数量,增加土壤动物的数量。而无机化学肥料通过细菌和植物的生长,对不同类群的土壤动物影响不同^[4]。Niklas 等对挪威云山林研究发现,在秋天使用固态化学肥料的样地中,土壤动物明显减少;使用液态化学肥料的样地中土壤动物却增加,且液态化学肥料较固态化学肥料对土壤动物的影响较小^[40]。

(4) 重金属。重金属污染物在环境中稳定,可以与土壤中的矿物相结合而固定,重金属元素的累积对土壤动物产生毒害作用,影响土壤动物的数量、类群、分布格局及其功能。数量和种类的减少主要表现在污染敏感种群的减少或消失,且随污染程度的不同有明显差异^[4](表 2)。

表 2 土壤重金属污染对土壤动物生态分布的影响¹⁾

Table 2 Effects of soil heavy metals pollution on ecological distribution of soil fauna

试验点编号 No. of sample	污染源距离 Distance to pollution source (km)	综合污染指数 Comprehensive pollution index (mg kg^{-1})	土壤动物密度 Density of soil fauna ($\times 10^4 \text{ m}^{-3}$)	蚯蚓种数 Species of earthworm
	1.0	13.2	33.51	5
	2.0	5.2	42.06	5
	2.5	8.4	41.20	5
	4.0	3.8	46.20	9
	9.0	0.97	94.98	9

1) 数据依据文献[3]:319~324 Data cited from literature [3]:319~324

2.2.3 全球变化 土壤生物区系在全球碳循环中的参与程度是科学家所关注的全球变化的主要问题之一^[41]。国外近年来利用 FACE(Free-Air CO₂ Enrichment) 开放式 CO₂ 系统进行了比较深入的研究^[42~44],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。Rillig 等^[43]开展了土壤原生动物对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应研究,结果表明:原生动物中的鞭毛虫 (*Mastigophora*)、变形虫 (*Amoebida*)、纤毛虫 (*Ciliata*) 种群数量没有显著性变化。Yeates 等研究得出,CO₂ 浓度倍增对草地生态系统中食细菌线虫、捕食性线虫和杂食线虫种群数量的增加产生极显著影响,而对食真菌线虫种群数量产生极显著的负效应^[44]。小节肢动物、线蚓等中型土壤动物和大型土壤动物蚯蚓对大气 CO₂ 浓度升高的响应研究也得出相似的结论^[23,41]。

氮沉降对土壤动物的多样性及其在生态系统中的功能也构成了极大的威胁。理论上,含氮酸性沉降物可以直接引起土壤动物死亡或使其有机体减弱,生长和繁殖减退,数量减少^[45],也可以影响土壤的理化性质;土壤 pH、水解氮^[46]、铵态氮^[47]等变化都对土壤动物数量、生物量及其功能产生影响。但实验上,目前还没有特定的全球变化试验来评价氮沉降对土壤动物的影响,但国外一些关于氮素对土壤动物影响的小尺度试验可以初步认识到氮沉降的影响^[48,49]。徐国良等^[50]通过人工喷施 HNO₃ 建立了一个模拟氮沉降增加梯度系列,发现土壤细菌和真菌的数量总体上随着氮处理的加强而持续显著地增长,施氮处理明显有利于土壤动物群落的发展,但是,这种效应具有明显的阈值。氮沉降处理与土壤动物的垂直分布之间有明显的交互作用。土壤表层为中氮处理土壤动物的最适点,而在最高强度的倍

高氮处理,土壤动物向土壤深层趋避。

3 土壤动物的生态功能

3.1 对枯落物的分解功能

土壤动物参与枯落物分解主要是通过两种方式:(1)通过粉碎、采食枯落物直接参与枯落物分解;(2)通过改变周围的物理、化学和生物性质间接影响枯落物分解。土壤动物对枯落物的粉碎,促进了物质的淋溶、下渗,还增加了土壤中细菌和真菌活动的接触面积,加速了养分的流动^[51];土壤动物通过直接采食细菌或真菌或通过有机物质的粉碎、微生物繁殖体的传播和有效营养物质的改变等间接方式来影响微生物群落的生物量和活动^[52],进而影响枯落物分解。众多研究表明,从枯落物分解试验中排除土壤动物后,凋落物中氮的损耗效率明显降低;而随着土壤动物的增加,土壤中有效元素如氮的含量明显升高^[53,54]。

但在枯落物分解研究中,土壤动物对枯落物分解的影响作用往往受到忽视,直接针对土壤动物对土壤有机质和枯落物分解作用的研究比较少。大部分研究仅限于对土壤动物分布格局和土壤腐殖质分解的简单论述,而土壤动物对有机质的转化和分解量的研究还很少^[55]。到目前为止,研究主要集中在森林枯落物分解的研究中。研究方法也比较单一,尼龙网袋法是目前枯落物分解实测广泛应用,而且也是唯一有效可行的方法。Vossbrinck 等^[56]用不同孔径的凋落物分解袋和杀菌处理来区分微生物、土壤动物和非生物因素对凋落物分解的贡献,结果发现没有生物作用的枯落物分解速率为 7.2%,只有微生物的分解速率为 15.2%,三者共同作用的分解速率则为 29.4%。Zlotin^[57]做了相似的实验,得到

对应值为 21%、24% 和 28%。张雪萍等^[58]和殷秀琴等^[59]应用网孔分别为 7 mm、0.5 mm 和 0.01 mm 的尼龙网袋对不同林型、不同林龄的森林中枯落物不同分解阶段,大型土壤动物、中小型土壤动物的分解作用进行了研究。

为了探索和证明土壤动物对枯落物分解过程的影响,国外学者从不同的角度进行了研究。概括起来主要有以下几个方面:(1)比较普遍的研究是应用网袋法和直接测量法,测定有、无土壤动物的条件下枯落物损失量、微生物活动及碳、氮含量的变化,来证明土壤动物的分解功能^[54,60]。(2)有些学者研究了枯落物分解过程中土壤动物对枯落物化学性质的影响,表明在枯落物分解过程中,土壤动物能够引起木质素、丹宁酸、纤维素、半纤维素、碳、氮等成分的变化^[61,62]。(3)Martin 等^[63]研究了无脊椎土壤动物分解者与枯落物化学性质全氮(TN)、全碳(TC)等之间相互作用对枯落物分解的影响。(4)也有些学者对某单一或几种关键种对枯落物分解的影响进行了研究^[52,64]。几种弹尾目土壤动物混合实验结果表明,土壤动物对生态系统过程的影响主要是由于弹尾目土壤动物群落的组成不同,而不是种类数的不同。(5)土壤动物对碳、氮循环和平衡的影响研究,已成为土壤生态学/土壤动物学研究的主要方向^[65],关于土壤动物在氮矿化中的作用国外已进行了许多实验探索,包括单一土壤动物类群、多种土壤动物类群和关键种对土壤动物的影响,但由于野外实验测定的困难,该方面的研究大部分只在小尺度的试验种群基础上开展。国内还没有类似的工作^[49]。(6)一些学者还对土壤动物中分解者内部功能进行了研究,研究业已证明,土壤动物的同一营养级中,甲螨和弹尾目土壤动物对枯落物分解率和养分循环的作用明显不同^[52]。但是,Laakso 等^[66]研究发现,在枯落物分解中同一营养级内土壤动物成分的变化效应远没有不同营养级间土壤动物成分变化效应大,但一些特定物种的功能具有不可替代性。Wardle^[67]由以上的发现总结出,在土壤动物物种层次上,土壤食物网具有相当丰富的功能,土壤过程主要是由土壤动物中的关键物种起推动作用。土壤动物中被称为“生态系统工程师”的动物类群对土壤有机质的转化作用最为重要。因为这些土壤动物类群通过物理活动和生理消化活动改变土壤的生物和非生物特征,控制着其他动物所需资源的有效性^[55]。(7)土壤动物对枯落物分解的影响因子研究。研究表明土壤动物对枯落物的分解受到土壤动

物密度、土壤环境和土壤动物间的相互作用影响^[55]。环境因子主要是温度和湿度^[23],Huish 等^[68]研究发现,马陆(*Glomeris marginata*)对橡树叶氮素的释放在恒定湿度下较干湿交替下更显著。Persson^[69]研究表明,小型土壤节肢动物对氮的矿化作用受到温度变化的影响,而对湿度变化没有响应。

国内研究内容与国外相比相对较窄,主要集中在不同类群土壤动物对森林落叶分解过程的影响^[58,59];枯落物不同分解阶段土壤动物的数量、类群的差异和某些类群土壤动物群落结构的变化动态^[59,70,71]。

3.2 生态指示功能

土壤动物特别是中型土壤动物具有密度大,种类多,分布广,活动范围小,迁移能力弱;对环境变化敏感;群落结构呈规律性季节变化,年度变化却相对稳定;调查方法简单有效;参与多种生物过程等性质和功能。而且,在食物链上土壤动物较土壤微生物处于更高的营养级,能够综合体现其生长环境特征;土壤动物的世代时间较土壤微生物长,使得稳定性更强。目前,土壤动物作为环境质量检测和评定的一种相对稳定的、综合的指示因子已经受到广泛的重视^[72]。Linden 等^[73]提出了土壤动物作为土壤质量指标,建立了三个类别的等级系统:有机体和种群(种类、形态、数量等)、群落(功能类群、营养类群、生物多样性)、生物过程(生物富集、分解作用、土壤结构的改变)。

线虫群落结构作为人类干扰的指示物,广泛应用于水生和陆生生态系统如深海、淡水湖泊、河流、湿地、森林、农田和极地土壤等^[74]。常用的指示指标有:丰富度、均匀度、优势度、多样性指数等,随着研究的深入又提出了成熟指数、关键种指数、生理生态指标等。高岩等^[75]综述了蚯蚓对土壤污染的指示作用及其对重金属的主要耐性机理。Lobry de Bruyn 等^[5]对蚂蚁的生态指示作用进行了研究。在意大利,一种基于小型土壤节肢动物被称为土壤生物质量(“Qualità Biologica del Suolo”, namely Biological Quality of Soil, QBS)指标的方法已经用来评价土壤生态质量^[76]。

3.3 其他功能

土壤动物其他重要的生态功能,主要体现在土壤动物影响土壤结构、土壤理化性质、土壤微生物和土壤酶活性和对整个土壤生物体系的功能性的调控作用。

土壤大型动物的挖洞筑穴活动能够减小土壤容

- 425 ~ 441
- [6] Eileen J K. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61: 61 ~ 76
- [7] Raija L, Niko S, Héctor C. Effects of water level and nutrients on spatial distribution of soil mesofauna in peatlands drained for forestry in Finland. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16: 1 ~ 9
- [8] 张雪萍, 侯威岭, 陈鹏. 东北森林土壤动物同功能种团及其生态分布. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(4): 370 ~ 374. Zhang X P, Hou WL, Chen P. Soil fauna guilds and their ecological distribution in the northeast of China (In Chinese). *J. Appl. Environ. Biol.*, 2001, 7(4): 370 ~ 374
- [9] Lavelle P. Faunal activities and soil process: Adaptive strategies that determine ecosystem function. *In: Transaction of International Congress of Soil Science*, 1994, 1: 189 ~ 220
- [10] Askidis M D, Stamu G P. Spatial and temporal patterns of an oribatid mite community in an evergreen-sclerophyllous formation (Hor-tatis, Greece). *Pedobiologia*, 1991, 35: 53 ~ 63
- [11] Addison J A, Trofymow J A, Marshall V G. Abundance, species diversity, and community structure of Collembolan in successional coastal temperate forests on Vancouver Island, Canada. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24: 233 ~ 246
- [12] Nassima S, Jear-François P. Soil animal communities in holm oak forests: Influence of horizon, altitude and year. *European Journal of Soil Biology*, 2003, 39: 197 ~ 207
- [13] 仲伟彦, 尹秀琴, 陈鹏. 帽儿山不同林型土壤动物的对比研究. *东北师范大学学报(自然科学版)*, 1998, 30(1): 69 ~ 74. Zhong W Y, Yin X Q, Chen P. Contrast study of soil animal in different types forest in Maershan (In Chinese). *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 1998, 30(1): 69 ~ 74
- [14] 张雪萍, 崔国发, 陈鹏. 人工落叶松林土壤动物生物量的研究. *应用生态学报*, 1996, 7(2): 150 ~ 154. Zhang X P, Cui G F, Chen P. Biomass of soil animals in Larch plantation (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(2): 150 ~ 154
- [15] 殷秀琴, 吴东辉, 韩晓梅. 小兴安岭森林土壤动物群落多样性的研究. *地理科学*, 2003, 23(3): 316 ~ 322. Yin X Q, Wu D H, Han X M. Diversity of soil animal guilds of forest in Xiaoxing-anling (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3): 316 ~ 322
- [16] 杨效东, 沙丽清. 西双版纳“龙山”片断热带雨林中小型土壤动物群落组成与多样性研究. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 261 ~ 265. Yang X D, Sha L Q. Composition and biodiversity of soil mesofauna in “Holy Hills” fragmental tropical forest of Xishuangbanna (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 261 ~ 265
- [17] 杨效东. 热带次生林、旱稻种植地和火烧迹地土壤节肢动物群落结构特征及季节变化. *生态学报*, 2003, 23(5): 873 ~ 884. Yang X D. Comparison of the communities structure and seasonal changes in diversity of soil arthropod in tropical secondary forest, dry-rice land and fired remains (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 873 ~ 884
- [18] 殷秀琴, 张宝田. 吉林省西部沙地与甸子地土壤动物的比较研究. *中国沙漠*, 1996, 16(2): 149 ~ 156. Yin X Q, Zhang B T. A contrast study on the soil animals in the study land and meadow in the west of Jilin Province (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 1996, 16(2): 149 ~ 156
- [19] 关宏斌, 郭砺, 刘永江. 科尔沁沙地土壤动物垂直分布、季节动态及群落多样性探讨. *中国沙漠*, 1999, 19(增刊 1): 110 ~ 114. Guan H B, Guo L, Liu Y J. The vertical distribution, seasonal dynamics and community variety of soil animal in Horqin sandy land (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 1999, 19(Suppl. 1): 110 ~ 114
- [20] Vegter J J, De Bie P, Dop H. Distributional ecology of forest floor Collembola (Entomobryidae) in the Netherlands. *Pedobiologia*, 1988, 31: 65 ~ 73
- [21] Kopeszki H, Meyer E. Artenzusammensetzung und Abundanz von Collembolan in Waldb. oden Vorarlbergs (Osterreich). *Ber. natur-wis.-med. Ver. Innsbruck*, 1994, 81: 151 ~ 166
- [22] Ulrich I. Long-term fluctuation of the soil fauna (Collembola and Oribatida) at groundwater-near sites in an alder wood. *Pedobiologia*, 2004, 48: 349 ~ 363
- [23] Sulkava P, Huhta V. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22: 225 ~ 239
- [24] Seifä H, Marshall V G, Trofymow J A. Influence of micro- and macro-habitat factors on Collembolan communities in Douglas-fir stumps during forest succession. *Appl. Soil Ecol.*, 1995, 2: 227 ~ 242
- [25] Anne P, Volkmar W. Influence of drought and litter age on Collembolan communities. *Eur. J. Soil Biol.*, 2001, 37: 305 ~ 308
- [26] Silvan N, Laiho R, Vasander H. Changes in mesofauna abundance in peat soils drained for forestry. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133: 127 ~ 133
- [27] Raija L, Niko S, Héctor C, *et al.* Effects of water level and nutrients on spatial distribution of soil mesofauna in peatlands drained for forestry in Finland. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16: 1 ~ 9
- [28] Koukoura Z, Mamolos A P, Kalburtji K L. Decomposition of dominant plant species litter in a semi-arid grassland. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23: 13 ~ 23
- [29] 刘永江, 刘新民, 乌宁, 等. 火生态因子与土壤动物关系的研究. *干旱区资源与环境*, 1996, 10(4): 67 ~ 73. Liu Y J, Liu X M, Wu N, *et al.* The study of the relationship between fire and soil animal (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1996, 10(4): 67 ~ 73
- [30] 杨效东, 唐勇, 唐建维, 等. 热带次生林刀耕火种过程中土壤节肢动物群落结构及多样性的变化. *生物多样性*, 2001, 9(3): 222 ~ 228. Yang X D, Tang Y, Tang J W, *et al.* Changes in structure and diversity of soil arthropod communities after slash and burn of secondary forest in Xishuangbanna, Yunnan Province (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2001, 9(3): 222 ~ 228
- [31] Neumann F G, Tolhurst K G. Effects of fuel reduction burning on epigeal arthropods and earthworms in dry sclerophyll eucalypt forest of west-central Victoria. *Aust. J. Ecol.*, 1991, 16: 315 ~ 330
- [32] Collett N G. Effects of three short rotation prescribed fires in spring on surface-active arthropods in dry sclerophyll eucalypt forest of west-

- and role of soil animals in Xiao Hinggan Mountains (In Chinese). *Geographical Research*, 2002, 21(6): 689 ~ 699
- [60] Xin K, Karin W, Juliane F. Effects of soil mesofauna and farming management on decomposition of clover litter: A microcosm experiment. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 731 ~ 738
- [61] Mark D H, Sina A, Catherine M P. Relative effects of macroinvertebrates and habitat on the chemistry of litter during decomposition. *Pedobiologia*, 2003, 47(2): 101 ~ 115
- [62] Ulrich I. Changes in the fauna and its contribution to mass loss and N release during leaf litter decomposition in two deciduous forests. *Pedobiologia*, 2000, 44(2): 105 ~ 118
- [63] Martin S, Roland B. Do invertebrate decomposers affect the disappearance rate of litter mixtures? *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 329 ~ 337
- [64] Grizelle G, Timothy R. Seastedt and Zugeily Donato earthworms, arthropods and plant litter decomposition in aspen (*Populus tremuloides*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) forests in Colorado, USA: The 7th International Symposium on Earthworm Ecology, Cardiff, Wales, 2002. *Pedobiologia*, 2003, 47(5/6): 863 ~ 869
- [65] Olof A, Thomas K, Riitta H. Projecting soil fauna influence on long-term soil carbon balances from faunal exclusion experiments. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18: 177 ~ 186
- [66] Laakso J, Setälä H. Sensitivity of primary production to changes in the architecture of belowground food webs. *Oikos*, 1999, 87: 57 ~ 64
- [67] Wardle D A, Bonner K L, Barker G M, *et al.* Plant removals in perennial grassland: vegetation dynamics, decomposers, soil biodiversity, and ecosystem properties. *Ecological Monographs*, 1999, 69: 535 ~ 568
- [68] Huish S, Leonard M A, Anderson J M. Wetting and drying effects on animal/microbial mediated nitrogen mineralization and mineral element losses from deciduous forest litter and raw humus. *Pedobiologia*, 1985, 28: 177 ~ 183
- [69] Persson T. Role of soil animals in C and N mineralisation. *Plant Soil*, 1989, 115: 241 ~ 245
- [70] 柯欣, 赵立军, 尹文英. 三种乔木落叶分解过程中跳虫群落结构的演替. *昆虫学报*, 2001, 44(2): 221 ~ 226. Ke X, Zhao L J, Yin W Y. Succession of Collembolan communities during decomposition of leaf litter under the three species of arborees (In Chinese). *Acta Entomologica Sinica*, 2001, 44(2): 221 ~ 226
- [71] 杨效东. 热带季节雨林凋落叶分解过程中的中小型土壤节肢动物的群落结构及动态. *生物多样性*, 2004, 12(2): 252 ~ 261. Yang X D. Dynamics and community structure of soil meso-microarthropods during leaf litter decomposition in tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Yunnan (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2004, 12(2): 252 ~ 261
- [72] Jennifer D K, David C C, Crossley Jr D A, *et al.* Biological indices of soil quality: An ecosystem case study of their use. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138: 357 ~ 368
- [73] Linden D R, Hendrix P F, Coleman D C, *et al.* Faunal indicators of soil quality. In: Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, *et al.* eds. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc., 1994. 91 ~ 106
- [74] Karin H. Soil nematode fauna of afforested mine sites: Genera distribution, trophic structure and functional guilds. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22: 113 ~ 126
- [75] 高岩, 骆永明. 蚯蚓对土壤污染的指示作用及其强化修复的潜力. *土壤学报*, 2005, 42(1): 140 ~ 148. Gao Y, Luo Y M. Earthworm as bioindicators of soil pollution and their potential for remediation of contaminated soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 140 ~ 148
- [76] Vittorio P, Cristina M. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: A new approach in Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105: 323 ~ 333
- [77] Sarr M, Agboghba C, Russell-Smith A, *et al.* Effects of soil faunal activity and woody shrubs on water infiltration rates in a semi-arid fallow of Senegal. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16: 283 ~ 290
- [78] 李德成, 李忠佩, 张桃林, 等. 白蚁活动与土壤环境之间的相互作用. *土壤*, 2003, 35(2): 98 ~ 102. Li D C, Li Z P, Zhang T L, *et al.* Interactions between termite activities and soil environments (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(2): 98 ~ 102
- [79] Lee K E. *Earthworms: Their Ecology and Relationships with Soil and Land Use*. Sydney: Academic Press, 1985
- [80] 胡锋, 刘满强, 李辉信. 土壤动物对土壤质量的影响及研究进展. 见: 中国土壤学会. 面向农业与环境的土壤科学. 北京: 科学出版社, 2004. 160 ~ 173. Hu F, Liu M Q, Li H X. Effects of soil fauna to soil quality and its research process (In Chinese). In: Soil Science Society of China. *Soil Science Facing Agriculture and Environment*. Beijing: Science Press, 2004. 160 ~ 173
- [81] 章家恩. 土壤生物多样性的研究内容及持续利用展望. *生物多样性*, 1999, 7(2): 140 ~ 144. Zhang J E. Research content and prospect of soil fauna biodiversity (In Chinese). *Biodiversity Science*, 1999, 7(2): 140 ~ 144
- [82] Richard D B, Roger C. Functional aspects of soil animal diversity in agricultural grasslands. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10: 263 ~ 276

