•研究报告•

上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性

靳亚丽¹ 李必成¹ 耿 龙² 卜 云^{1*}

1 (上海科技馆, 上海自然博物馆, 自然史研究中心, 上海 200041)

2 (上海海洋管理事务中心, 上海 200050)

摘要: 大金山岛属上海市金山三岛海洋生态保护区, 岛上土壤未受到人为活动的污染。为了解不同自然植被类型下土壤动物群落结构组成及其生态分布, 于2015年秋季在大金山岛竹林、乔木林和灌木林的南、北坡中分别进行土壤动物采样。结果显示: 6个样地共捕获土壤动物12,769只, 隶属于28个类群, 优势类群为蜱螨亚纲和弹尾纲, 分别占总捕获量的70.15%和19.27%; 常见类群有原尾纲、半翅目、膜翅目和线蚓科, 占总捕获量的7.06%。北坡和南坡优势类群均为蜱螨亚纲(74.26%、65.32%)和弹尾纲(16.52%、22.49%), 但常见类群和稀有类群存在一定差异。不同植被类型土壤动物的群落结构组成存在一定差异, 但无论是北坡还是南坡密度均为灌木林 > 乔木林 > 竹林, 类群数变化为灌木林 > 竹林 > 乔木林。无论北坡还是南坡, 不同植被类型下土壤动物群落生态指数各不相同, Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数均为灌木林 > 乔木林 > 竹林。大金山岛灌木林中土壤动物群落多样性高于乔木林和竹林, 很可能与灌木林中较为适宜的微环境有关。

关键词: 岛屿; 自然植被; 群落密度; 坡度

Soil fauna community in different natural vegetation types of Dajinshan Island, Shanghai

Yali Jin¹, Bicheng Li¹, Long Geng², Yun Bu^{1*}

1 Natural History Research Center, Shanghai Natural History Museum, Shanghai Science & Technology Museum, Shanghai 200041

2 Shanghai Administration Center for Ocean Affairs, Shanghai 200050

Abstract: Dajinshan Island is part of Jinshan Three-Islands Marine Natural Reserve. Soil on the island has not been polluted by human activities and it is therefore an ideal place to study island ecosystem diversity. To understand the composition and ecological distribution of soil fauna communities in different natural forest vegetation types on Dajinshan Island, the soil fauna communities in three natural forests including bamboo forest, arboreal forest, and shrubbery were investigated during autumn 2015. Each forest included both north slope and south slope regions. A total of 12,769 individuals of soil fauna belonging to 28 groups were collected. The dominant groups were Acari and Collembola, accounting for 70.15% and 19.27%, respectively. The common groups were Protura, Hemiptera, Hymenoptera and Enchytraeidae, and they accounted for 7.06% of the total in terms of individual numbers. The dominant groups were Acari (74.26%, 65.32%) and Collembola (16.52%, 22.49%) in both north slope and south slope regions, but differed in common groups and rare groups. The soil fauna communities were different in the three natural forests. In both north and south slope region, the density of soil fauna followed the order of: shrubbery > arboreal forest > bamboo forest, but the number of groups of soil fauna followed the order of: shrubbery > bamboo forest > arboreal forest. Different ecological indexes of soil fauna communities in the three natural forests were different. Shannon-Wiener index, Pielou index, and Simpson index followed the following order: shrubbery > arboreal forest > bamboo forest in both north and south slope regions. The Shannon-Wiener index was significantly different in the three natural forests. The higher soil fauna diversity in shrubbery was probably induced by the

收稿日期: 2016-10-21; 接受日期: 2016-12-31

基金项目: 上海海洋管理事务中心2015年大金山岛生态调查项目、上海市自然科学基金资助项目(17ZR1418700)、上海科技馆引进高层次人才科研启动项目和上海科技馆种子课题

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: buy@sstm.org.cn

favorable microenvironment.

Key words: Island; natural vegetation; community density; slope

土壤动物是重要的分解者,在森林生态系统的物质循环和能量流动过程中有着不可替代的作用(Wolters, 2001; Decaëns et al, 2006)。近年来,国内外学者对于森林土壤动物开展了大量研究,结果表明,人为干扰(Malmström et al, 2008; 陈小鸟等, 2009a; Čuchta et al, 2012)、海拔(Sadaka & Ponge, 2003; 陈小鸟等, 2009b)、植被(廖崇惠等, 1997; 林英华等, 2005)等对土壤动物群落的动态分布均产生直接或间接的影响。土壤动物与地上植物群落之间有着动态的相互作用(Wardle et al, 2004),已有研究表明,地上植被的演替变化明显影响地下土壤动物群落组成(易兰, 2005)。

岛屿生态系统具有特殊的地理位置和环境特点,其中自然植被的变化对地下土壤动物会有怎样的影响,目前尚未见文献报道。国外对于岛屿土壤动物的研究多集中于系统分类(Sterzynska & Bloger, 2004; Babenko, 2010; Greenslade & Convey, 2011),群落多样性的研究相对较少,仅有Addison等(2003)研究了加拿大温哥华岛沿海温带森林的跳虫群落多样性;Hugo等(2006)研究了亚南极地区的爱德华王子岛上的土壤小型节肢动物,发现该岛与邻近的Marion岛上土壤动物多样性有显著差异;Gudleifsson 和 Bjarnadottir (2008)对冰岛上不同草地中的跳虫群落多样性进行了比较研究。

国内岛屿土壤动物多样性的研究十分匮乏,黄杰灵^①对浙江千岛湖人工形成的16个面积不等的岛屿土壤动物的研究表明,土壤节肢动物类群数随岛屿等级的增大显著增多;刘扬等(2011)发现崇明岛不同土地利用类型中的土壤动物存在明显差异,苗圃和公园中的多样性较高,农田的多样性最低;谢桐音^②对山东滨州贝壳堤岛土壤动物和跳虫群落的生态学研究发现,无植被覆盖的近海区域土壤动物表现出逆层分布的现象,且土壤跳虫丰度随覆被植物多样性的增加而显著增加。

大金山岛是上海市金山三岛海洋生态保护区

中最大的岛屿,其自然植被保护良好,土壤尚未受到人为污染(程芳等, 2013),是开展岛屿生态系统自然植被中土壤动物多样性研究的理想样地。本文通过对大金山岛具有代表性的3种自然植被的土壤动物群落组成进行研究,以期上海及邻近地区自然林地生物多样性的保护以及土壤生态系统评价及修复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大金山岛(30°41'42" N, 121°24'25" E)地处上海金山区附近的杭州湾中,位于中亚热带北缘,是金山三岛海洋生态自然保护区的核心区。大金山岛距金山嘴海岸约6.6 km,东西长约1 km,宽约0.3 km,最高处海拔105.3 m,年平均气温15.8℃,土壤为褐色山地黄壤,降水充沛,四周被水域包围,属海洋性气候,温和湿润,四季分明。岛上植被生长茂盛,是上海地区野生植物资源最丰富的地方,由于受人为干扰少,岛上植被进入自然的次生演替过程(李必成, 2014)。代表性植被类型有:以野桐属(*Mallotus*)、青冈属(*Cyclobalanopsis*)、润楠属(*Machilus*)、樟属(*Cinnamomum*)、朴属(*Celtis*)、花椒属(*Zanthoxylum*)、黄檀属(*Dalbergia*)植物为主的乔木林;以卫矛属(*Euonymus*)、大青属(*Clerodendron*)、算盘子属(*Glochidion*)、桤属(*Eurya*)植物为主的灌木林;以毛竹属(*Phyllostachys*)植物为主的竹林(杨永川等, 2002)。

1.2 采样方法

分别在竹林北(ZL-N)、竹林南(ZL-S)、乔木林北(QML-N)、乔木林南(QML-S)、灌木林北(GML-N)、灌木林南(GML-S)共设置6个样地(图1),每个样地随机设置5个采样点。于2015年秋季,采用土壤定量采样器,在每个样点采集15 cm × 15 cm × 15 cm的土样带回实验室,采用干漏斗法分离土壤动物,土壤动物收集在95%的乙醇溶液中。分离所得的土壤动物采用体视显微镜观察,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。

① 黄杰灵 (2012) 千岛湖片段化景观中土壤节肢动物多样性研究. 硕士学位论文, 中国计量学院, 杭州.

② 谢桐音 (2010) 滨州贝壳堤岛土壤动物和跳虫群落生态学定量研究. 硕士学位论文, 山东师范大学, 济南.

图1 大金山岛的地理位置及采样点设置。ZL: 竹林; QML: 乔木林; GML: 灌木林; N: 北坡; S: 南坡。

Fig. 1 The location of Dajinshan Island and soil fauna sampling sites. ZL, bamboo forest; QML, arboreal forest; GML, shrubbery; N, North slope; S, South slope.

1.3 数据分析

根据以下公式分别计算凋落物中土壤动物群落的多样性指数、均匀度指数、优势度指数和丰富度指数(孙儒泳, 2001)。

(1) Shannon-Wiener 多样性指数 (H'): $H' = -\sum n_i / N \ln(n_i / N)$ 。

(2) Pielou 均匀度指数 (J_s): $J_s = H' / \ln S$ 。

(3) Simpson 优势度指数 (C): $C = \sum P_i^2$ 。

(4) Margalef 丰富度指数 (D): $D = (S - 1) / \ln N$ 。

式中, n_i 为第 i 个类群的个体数; N 为群落中所有类群的总个体数; S 为类群数; $P_i = n_i / N$ 。

我们定义密度 $> 10\%$ 的为优势类群; $1\% \leq$ 密度 $\leq 10\%$ 的为常见类群; 密度 $< 1\%$ 的为稀有类群。

采用 Excel 2007 进行图表绘制和计算, SPSS 19.0 进行方差分析。

2 结果

2.1 土壤动物群落组成及南北坡比较

大金山岛自然植被调查共捕获土壤动物 12,769 只, 总密度为 31,528 只/m², 隶属于 28 个类群。经统计得出: 蜚蠊亚纲、弹尾纲分别占总捕获量的 70.15% 和 19.27%, 为优势类群; 原尾纲、半翅目、膜翅目和线蚓科为常见类群, 合计占总捕获量的 7.06%; 双尾纲、直翅目等 21 个类群为稀有类群, 合计占总捕获量的 3.52%。

北坡共捕获土壤动物 26 类 6,901 只, 占 54.05%, 南坡共捕获 24 类 5,868 只, 占 45.96%。北坡和南坡优

势类群均为蜚蠊亚纲(74.26%、65.32%)和弹尾纲(16.52%、22.49%), 但常见类群和稀有类群存在一定差异(表1)。北坡的常见类群为原尾纲和线蚓科, 占北坡总数的 4.39%, 南坡的常见类群为半翅目、双翅目幼虫和膜翅目, 占南坡总数的 8.27%。稀有类群中直翅目和缨翅目只在南坡出现, 啮目、蜈蚣目、后孔寡毛目和腹足纲只在北坡出现。

2.2 各植被类型土壤动物密度比较

不同植被类型中土壤动物密度和群落组成不同(表2), 无论是北坡还是南坡密度均为灌木林 $>$ 乔木林 $>$ 竹林, 但各样地间密度和类群差异不显著($P > 0.05$); 竹林和乔木林优势类群都包括蜚蠊亚纲(60.65%、63.41%)和弹尾纲(28.41%、23.53%), 灌木林优势类群只有蜚蠊亚纲(81.95%); 竹林和乔木林的常见类群也相差不大, 都有原尾纲(2.79%、1.84%)、双翅目幼虫(1.21%、1.34%)和膜翅目(1.18%、1.60%)等, 但灌木林常见类群与竹林、乔木林不同, 多了弹尾纲(9.93%)、半翅目(2.57%)等; 稀有类群组成也存在一定差异, 直翅目只在乔木林出现, 等翅目、啮目、双翅目成虫和腹足纲只在灌木林出现, 蜈蚣目只在竹林出现。三种植被类型下土壤动物类群数为灌木林 $>$ 竹林 $>$ 乔木林。

2.3 土壤动物群落多样性比较

大金山岛不同植被类型下土壤动物群落各多样性指数不同(图2)。无论北坡还是南坡, Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数都是灌木林最高, 乔木林次之, 竹林最低, 且在竹林和乔木林两个类型中都是北坡高于南坡,

表1 大金山岛南坡和北坡土壤动物群落组成和密度(ind./m²)
Table 1 Soil fauna communities and densities (ind./m²) of south slope and north slope of Dajinshan Island

类群 Group	北坡 North slope			南坡 South slope		
	个体数 Individuals	密度 Density (%)	优势度 Dominance	个体数 Individuals	密度 Density (%)	优势度 Dominance
蜱螨亚纲 Acari	5,125	25,309 (74.26)	+++	3,833	18,928 (65.32)	+++
弹尾纲 Collembola	1,140	5,630 (16.52)	+++	1,320	6,519 (22.49)	+++
线虫纲 Nematoda	62	306 (0.90)	+	198	978 (3.37)	++
原尾纲 Protura	147	726 (2.13)	++	42	207 (0.72)	+
线蚓科 Enchytraediae	156	770 (2.26)	++	28	138 (0.48)	+
半翅目 Hemiptera	4	20 (0.06)	+	132	652 (2.25)	++
膜翅目 Hymenoptera	55	272 (0.80)	+	78	385 (1.33)	++
双翅目幼虫 Diptera larvae	48	237 (0.70)	+	77	380 (1.31)	++
综合纲 Symphyla	28	138 (0.41)	+	24	119 (0.41)	+
等足目 Isopoda	15	74 (0.22)	+	36	178 (0.61)	+
少足纲 Pauropoda	27	133 (0.39)	+	17	84 (0.29)	+
倍足纲 Diplopoda	25	123 (0.36)	+	16	79 (0.27)	+
双尾纲 Diplura	17	84 (0.25)	+	15	74 (0.26)	+
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	10	49 (0.14)	+	11	54 (0.19)	+
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	10	49 (0.14)	+	7	35 (0.12)	+
拟蝎目 Pseudoscorpionida	3	15 (0.14)	+	10	49 (0.17)	+
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	7	35 (0.10)	+	5	25 (0.09)	+
蜘蛛目 Araneae	6	30 (0.09)	+	4	20 (0.07)	+
缨翅目 Thysanoptera	0	0		6	30 (0.10)	+
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	5	25 (0.07)	+	1	5 (0.02)	+
等翅目 Isoptera	1	5 (0.01)	+	4	20 (0.07)	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	2	10 (0.03)	+	2	10 (0.03)	+
后孔寡毛目 Oligochaetaopisthopora	4	20 (0.06)	+	0	0	
双翅目成虫 Diptera adult	1	5 (0.01)	+	1	5 (0.02)	+
直翅目 Orthoptera	0	0		1	5 (0.02)	+
啮目 Psocoptera	1	5 (0.01)	+	0	0	
蜈蚣目 Scolopendromorpha	1	5 (0.01)	+	0	0	
腹足纲 Gastropoda	1	5 (0.01)	+	0	0	
总数 Total	6,901	34,079		5,868	28,978	

+++ 优势类群; ++ 常见类群; + 稀有类群。
+++ Dominant groups; ++ Common groups; + Rare groups.

灌木林只有Simpson优势度指数表现为北坡高于南坡。对南坡各样地Shannon-Wiener多样性指数进行比较发现: 灌木林南坡与竹林南坡、乔木林南坡之间存在显著差异($F = 2.56, P < 0.05$)。对各样地Pielou均匀度指数进行方差分析发现: 灌木林南坡显著高于其他样地, 灌木林北坡显著高于竹林南和乔木林南坡($F = 3.08, P < 0.05$)。灌木林不论南北坡Simpson优势度都显著高于其他样地($F = 8.13, P < 0.05$)。竹林北坡与竹林南坡Margalef丰富度存在显

著差异($F = 1.69, P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 土壤动物群落组成与密度

除温湿度外, 人为干扰是影响土壤动物群落结构的主要因素(武海涛等, 2006), 大金山岛为自然演替植被, 受人为干扰程度低, 土壤动物总密度明显比上海市森林中土壤动物密度高(王强等, 2012; 靳士科等, 2016), 类群数量多于上海城市绿地中土壤

表2 大金山岛各植被类型中土壤动物群落组成和密度(ind./m²)
Table 2 Soil fauna communities and densities (ind./m²) under different vegetation types on Dajinshan Island

类群 Group	竹林 Bamboo forest			乔木林 Arboreal forest			灌木林 Shrubbery		
	个体数 Indivi- duals	密度 Density (%)	优势度 Domin- ance	个体数 Indi- viduals	密度 Density (%)	优势度 Domin- ance	个体数 Indi- viduals	密度 Density (%)	优势度 Domin- ance
蜚蠊亚纲 Acari	1,851	13,711 (60.65)	+++	2,929	21,696 (63.41)	+++	4,178	30,948 (81.95)	+++
弹尾纲 Collembola	867	6,422 (28.41)	+++	1,087	8,052 (23.53)	+++	506	3,748 (9.93)	++
线虫纲 Nematoda	33	244 (1.08)	++	169	1,252 (3.66)	++	58	430 (1.14)	++
原尾纲 Protura	85	630 (2.79)	++	85	630 (1.84)	++	19	141 (0.37)	+
线蚓科 Enchytraediae	12	89 (0.39)	+	100	741 (2.16)	++	72	533 (1.41)	++
半翅目 Hemiptera	3	22 (0.10)	+	2	15 (0.04)	+	131	970 (2.57)	++
膜翅目 Hymenoptera	36	267 (1.18)	++	74	548 (1.60)	++	23	170 (0.45)	+
双翅目幼虫 Diptera larvae	37	274 (1.21)	++	62	459 (1.34)	++	26	193 (0.51)	+
综合纲 Symphyla	24	178 (0.79)	+	15	111 (0.32)	+	13	96 (0.26)	+
等足目 Isopoda	15	111 (0.49)	+	20	148 (0.43)	+	16	119 (0.31)	+
少足纲 Pauropoda	33	244 (1.08)	++	5	37 (0.11)	+	6	44 (0.12)	+
倍足纲 Diplopoda	18	133 (0.59)	+	15	111 (0.32)	+	8	59 (0.16)	+
双尾纲 Diplura	2	15 (0.07)	+	23	170 (0.50)	+	7	52 (0.14)	+
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	10	74 (0.33)	+	4	30 (0.09)	+	7	52 (0.14)	+
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	7	52 (0.23)	+	6	44 (0.13)	+	4	30 (0.08)	+
拟蝎目 Pseudoscorpionida	1	7 (0.03)	+	11	81 (0.24)	+	1	7 (0.02)	+
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	7	52 (0.23)	+	4	30 (0.09)	+	1	7 (0.02)	+
蜘蛛目 Araneae	1	7 (0.03)	+	4	30 (0.09)	+	5	37 (0.10)	+
缨翅目 Thysanoptera	2	15 (0.07)	+	2	15 (0.04)	+	2	15 (0.04)	+
鳞翅目幼虫 Lepodoptera lar- vae	2	15 (0.07)	+	0	0		4	30 (0.08)	+
等翅目 Isoptera	0	0		0	0		5	37 (0.10)	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	1	7 (0.03)	+	1	7 (0.02)	+	2	15 (0.04)	+
后孔寡毛目 Oligochaetaopis- thopora	4	30 (0.13)	+	0	0		0	0	
双翅目成虫 Diptera adult	0	0		0	0		2	15 (0.04)	+
直翅目 Orthptera	0	0		1	7 (0.02)	+	0	0	
啮目 Psocoptera	0	0		0	0		1	7 (0.02)	+
蜈蚣目 Scolopendromorpha	1	7 (0.13)	+	0	0		0	0	
腹足纲 Gastropoda	0	0		0	0		1	7 (0.02)	
合计 Total	3,052	22,607 (100)		4,619	34,215 (100)		5,098	37,763 (100)	

+++ 优势类群; ++ 常见类群; + 稀有类群。
+++ Dominant groups; ++ Common groups; + Rare groups.

动物的类群数(高艳等, 2007)。

植物群落结构差异能够对土壤动物群落组成产生影响(Kardol et al, 2010; 李伟等, 2015)。Gladys 等(2007)认为优势植物的凋落物与土壤动物群落组成具有一定的相关性, 丰富的植物群落结构增加了地下土壤的异质性, 进一步影响土壤动物的群落组成。本研究也发现不同植被类型中土壤动物密度、类群数均存在一定程度差异, 且明显表现为植物群落组成越简单的竹林土壤动物密度相对较低, 其次

分别为乔木林和灌木林。

此外, 不同林地凋落物层各自特殊的组成成分差异以及营养物质或次生物质间各自的相互作用, 为土层中土壤动物提供了不同的食物源和栖息小环境, 这也是导致各林地间土壤动物组成差异的主要原因之一(易兰等, 2005; 靳亚丽等, 2011)。

3.2 各林地土壤动物多样性

森林的次生演替对土壤动物群落结构产生影响, 大金山岛三种林型由于自然的次生演替形成

图2 大金山岛不同植被类型下土壤动物群落生态指数(平均值 ± 标准差)。字母不同表示差异显著($P = 0.05$)。ZL: 竹林; QML: 乔木林; GML: 灌木林。

Fig. 2 Ecological indices of soil fauna communities of different vegetation types in Dajinshan Island (Mean ± SD). Different letters show the significant difference at $P = 0.05$ level. ZL, bamboo forest; QML, arboreal forest; GML, shrubbery.

(达良俊等, 2004), 演替过程中植物群落的更替也是导致土壤动物多样性差异的原因之一(易兰, 2005)。本研究发现竹林土壤动物多样性均低于乔木林和

灌木林, 苏永春等(2004)的研究结果也表明竹林土壤动物丰度低, 竹林单一的植物群落可能是导致这一结果的主要原因。北坡接受阳光照射较南坡少, 土壤湿度相对较高, 因而除灌木林外其他林型土壤动物群落的Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数都表现为北坡高于南坡。灌木林相对于乔木林更接近地被层, 受外界环境干扰较小, 容易在下层形成温暖潮湿的小气候而更利于土壤动物的聚集, 因此灌木林土壤动物多样性指数最高, 均匀度指数和优势度指数也显著高于竹林和乔木林(图2)。而灌木林南坡相对位置较低, 靠近海域, 受海洋性气候影响而形成的土壤异质性可能是导致该样地均匀度显著高于其他样地的原因。

此外, 本研究中竹林、乔木林和灌木林的位置不同, 难以避免空间异质性造成的影响, 且南北坡的差异是基于3种不同林型得出的结论, 而不同林地类型本身也存在差异, 因此本研究只能说明该岛屿土壤动物群落多样性的整体状况, 对于各林型和坡向造成的土壤动物群落差异还有待进一步研究和探讨。

致谢: 本项目实施过程中受到上海市海洋局、上海市金山区海洋海塘管理所等单位的大力支持, 同时感谢杨斯琦、杨刚、高如峰、王万胜、杜运才、巢移等同志对本项目野外采样等工作的倾力协助。

参考文献

- Addison JA, Trofymow JA, Marshall VG (2003) Abundance, species diversity, and community structure of Collembola in successional coastal temperate forests on Vancouver Island, Canada. *Applied Soil Ecology*, 24, 233–246.
- Babenko AB (2010) The springtail (Hexapoda, Collembola) fauna of Wrangel Island. *Entomological Review*, 90, 571–584.
- Chen XN, You WH, Wang XY, Yi L (2009a) Community traits of soil animal under different ground cover treatments in evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 17, 160–167. (in Chinese with English abstract) [陈小鸟, 由文辉, 王向阳, 易兰 (2009a) 常绿阔叶林不同砍伐处理下土壤动物的群落特征. *生物多样性*, 17, 160–167.]
- Chen XN, You WH, Yi L (2009b) Community structure of soil fauna along an altitudinal gradient in Taibai Mountain of Tiantong Region, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 270–276. (in Chinese with English abstract) [陈小鸟, 由文辉, 易兰 (2009b) 浙江天童太白山不同海拔土壤动物的群落结构. *生态学杂志*, 28, 270–276.]

- Cheng F, Cheng JP, Sang HC, Yu JL, Xi L, Pi SS (2013) Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan Island. *Environmental Science*, 34, 1062–1066. (in Chinese with English abstract) [程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (2013) 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析. *环境科学*, 34, 1062–1066.]
- Čuchta P, Miklisová D, Kováč L (2012) A three-year study of soil Collembola communities in spruce forest stands of the High Tatra Mts (Slovakia) after a catastrophic windthrow event. *European Journal of Soil Biology*, 50, 151–158.
- Da LJ, Yang YC, Chen YP (2004) The diversity of plant community on Dajinshan Island, Shanghai. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2(3), 22–25. (in Chinese with English abstract) [达良俊, 杨永川, 陈燕萍 (2004) 上海大金山岛的自然植物群落多样性. *城镇绿化*, 2(3), 22–25.]
- Decaënsa T, Jiménez JJ, Gioia C, Measey GJ, Lavelle P (2006) The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, 23–38.
- Gao Y, Bu Y, Luan YX, Yang YM, Ke X (2007) Community composition and diversity of soil fauna in the land use of city planning: a case study in Shanghai World Exposition Site. *Biodiversity Science*, 15, 207–214. (in Chinese with English abstract) [高艳, 卜云, 栾云霞, 杨毅明, 柯欣 (2007) 城市新规划地土壤动物群落组成和多样性: 以上海市世博会会址为例. *生物多样性*, 15, 207–214.]
- Gladys LM, Daniel I, France BR, Patrick L (2007) Soil fauna abundance and diversity in a secondary semi-evergreen forest in Guadeloupe (Lesser Antilles): influence of soil type and dominant tree species. *Biology and Fertility of Soils*, 44, 269–276.
- Greenslade P, Convey P (2011) Exotic Collembola on subantarctic islands: pathways, origins and biology. *Biological Invasions*, 14, 405–417.
- Gudleifsson BE, Bjarnadottir B (2008) Springtail (Collembola) populations in hayfields and pastures in northern Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 21, 49–59.
- Hugo EA, Chown SL, McGeoch MA (2006) The microarthropods of sub-Antarctic Prince Edward Island: a quantitative assessment. *Polar Biology*, 30, 109–119.
- Jin SK, Wang JJ, Zhu S, Zhang Q, Li X, Zheng WJ, You WH (2016) Soil meso- and micro-fauna community structures in different urban forest types in Shanghai, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 2363–2371. (in Chinese with English abstract) [靳士科, 王娟娟, 朱莎, 张琪, 黎翔, 郑文静, 由文辉 (2016) 上海市不同类型城市森林中小型土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 27, 2363–2371.]
- Jin YL, You WH, Yi L, Wang XY, Wang Q (2011) Ecological distribution of collembola in the litter of Tiantong forest ecosystems, Zhejiang. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 241–247. (in Chinese with English abstract) [靳亚丽, 由文辉, 易兰, 王向阳, 王强 (2011) 天童森林生态系统凋落物层跳虫群落的生态学研究. *生态环境学报*, 20, 241–247.]
- Kardol P, Cregger MA, Company CE, Classen AT (2010) Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects. *Ecology*, 91, 767–781.
- Li BC (2014) Scientific Research Report of Dajinshan Island, Shanghai. Shanghai Science and Technology Education Publishing House, Shanghai. (in Chinese) [李必成 (2014) 大金山岛科学考察报告. 上海科技教育出版社, 上海.]
- Li W, Cui LJ, Zhao XS, Zhang MY, Gao CJ, Zhang Y, Wang YF (2015) Community structure and diversity of soil animals in the Lake Taihu lakeshore wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 944–955. (in Chinese with English abstract) [李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 张曼胤, 高常军, 张岩, 王义飞 (2015) 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与多样性. *生态学报*, 35, 944–955.]
- Liao CH, Li JX, Huang HT (1997) Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 17, 549–555. (in Chinese with English abstract) [廖崇惠, 李健雄, 黄海涛 (1997) 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 17, 549–555.]
- Lin YH, Zhang FD, Zhang JQ, Ouyang XJ, Mo DS, Zhou GY (2005) Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 2616–2622. (in Chinese with English abstract) [林英华, 张夫道, 张俊清, 欧阳学军, 莫定生, 周国逸 (2005) 鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化. *生态学报*, 25, 2616–2622.]
- Liu Y, Zhang A, Yan Y, Li K, Fang Y (2011) Diversity of soil animal community under different land-use types in Chongming Island. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 50, 288–295. (in Chinese with English abstract) [刘扬, 张岸, 严莹, 李恺, 方燕 (2011) 崇明岛不同土地利用类型下土壤动物群落多样性研究. *复旦学报(自然科学版)*, 50, 288–295.]
- Malmström A, Persson T, Ahlström K (2008) Effects of fire intensity on survival and recovery of soil microarthropods after a clearcut burning. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 2465–2475.
- Sadaka N, Ponge JF (2003) Soil animal communities in holm oak forests: influence of horizon, altitude and year. *European Journal of Soil Biology*, 39, 197–207.
- Sterzynska M, Bloger T (2004) Collembola of North Bull Island—new records for the Irish coast. *Fragmenta Faunistica*, 47, 47–50.
- Su YC, Gou YB, Yu D, Wang JY (2004) Diversity of soil invertebrate communities at Yushan Hill, Changshu, Jiangsu Province. *Biodiversity Science*, 12, 333–338. (in Chinese with English abstract) [苏永春, 勾影波, 郁达, 王继元 (2004) 江苏常熟虞山土壤动物群落多样性研究. *生物多样性*, 12, 333–338.]
- Sun RY (2001) *Principles of Animal Ecology*, 3rd version.

- Beijing Normal University Press, Beijing. (in Chinese) [孙儒泳 (2001) 动物生态学原理, 第3版. 北京师范大学出版社, 北京.]
- Wang Q, Luo Y, Jin YL, You WH (2012) Community structure of soil fauna in forest belt of different areas of Shanghai in Fall. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 28, 669–674. (in Chinese with English abstract) [王强, 罗燕, 靳亚丽, 由文辉 (2012) 上海市外环林带秋季不同区域土壤动物群落结构. *生态与农村环境学报*, 28, 669–674.]
- Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, Parton WH, Wall DH (2004) Ecological linkages between above-ground and belowground biota. *Science*, 304, 1629–1633.
- Wolters V (2001) Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology*, 37, 221–227.
- Wu HT, Lü XG, Yang Q, Jiang M (2006) Ecological characteristics and functions of soil fauna community. *Acta Pedologica Sinica*, 43, 314–323. (in Chinese with English abstract) [武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明 (2006) 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 43, 314–323.]
- Yang YC, Da LJ, Qin XK (2002) A study on the flora of Dajinshan Island in Shanghai, China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 20, 433–437. (in Chinese with English abstract) [杨永川, 达良俊, 秦祥堃 (2002) 上海大金山岛种子植物区系的研究. *武汉植物学研究*, 20, 433–437.]
- Yi L (2005) Influences of Secondary Succession of the Damaged Evergreen Broad-leaved Forest on Soil Animal Community in Tiantong, Zhejiang Province. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [易兰 (2005) 浙江天童受损常绿阔叶林的次生演替对土壤动物群落的影响. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Yi L, You WH, Song YC (2005) Soil animal communities in the litter of the evergreen broad-leaved forest at five succession stages in Tiantong. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 466–473. (in Chinese with English abstract) [易兰, 由文辉, 宋永昌 (2005) 天童常绿阔叶林五个演替阶段凋落物中的土壤动物群落. *生态学报*, 25, 466–473.]
- 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.]
- 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.]

(责任编辑: 吴东辉 责任编辑: 闫文杰)