

武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征

王邵军^{1,2}, 阮宏华^{1,*}, 汪家社³, 徐自坤³, 吴焰玉³

(1. 西南林业大学, 环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. 南京林业大学, 江苏省林业生态工程重点实验室, 南京 210037;
3. 福建省武夷山国家级自然保护区管理局, 福建武夷山 354315)

摘要: 选择武夷山不同海拔高度的 4 个典型植被群落 (EVB, COF, DWF 和 ALM), 对其土壤动物群落的结构和变化进行研究, 结果表明, 植被沿海拔梯度变化对土壤动物类群数、密度和多样性产生了显著的影响。不同海拔高度样地中, 密度-类群 DG 多样性指数和土壤动物数量沿海拔高度上升呈显著递减趋势; 数量占优势的土壤动物类群膜翅目 ($F=6.35$, $P<0.001$)、蜱螨目 ($F=9.25$, $P<0.01$)、弹尾目 ($F=5.93$, $P<0.05$) 和鞘翅目 ($F=4.42$, $P<0.05$) 的密度在不同海拔样地之间存在显著的差异。除高山草甸外, 土壤动物群落在土层中的垂直分布呈明显“表聚现象”。但高山草甸的弹尾目、膜翅目、双翅目 (幼虫) 和等足目等类群较多地聚集在 10—25 cm 土层。不同海拔高度土壤动物的类群总数和总个体数量表现为 2 种季节变化模式: (1) 常绿阔叶林和针叶林秋季大量发生; (2) 亚高山矮林和高山草甸夏季大量发生且数量接近。

关键词: 海拔; 土壤动物; 植被; 生物多样性; 武夷山

Composition structure of soil fauna community under the typical vegetations in the Wuyi Mountains, China

WANG Shaojun^{1,2}, RUAN Honghua^{2,*}, WANG Jiashe³, XU Zikun³, WU Yanyu³

1 Department of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 The National Natural Preserve of Wuyi Mountains in Fujian Province, Wuyi Shan 354315, China

Abstract: Altitudinal gradient often leads climatic effects which would result from latitudinal changes, and so has been used as a surrogate for latitudinal gradient. This has prompted the research on biodiversity dynamics across an elevation gradient. Little is known, however, about the response of soil biota to the changes of climate, vegetation and soil along an elevation gradient. We examined the changes of soil faunal diversity under the four typical vegetations i. e. evergreen broadleaf forest (EVB), coniferous forest (COF), dwarf forest (DWF), and alpine meadow (ALM) during April 2007 to 2008 in the Wuyi Mountains in southeastern China. Our findings were as following: (1) The composition of dominant groups were found no difference along the elevation gradient with Mites and Collembolans both accounting for 60% of the total. The common groups were Eiymentoptera, Diptera, Coleoptera, Symphyla, Isopoda, and Araneae, respectively, at the four sites. The Jaccard comparability coefficients (between 0.8000 and 0.8696) of soil fauna were similar at three forest sites while there were distinct different between sites of EVB and ALM, and COF and ALM, indicating that the aboveground vegetation had significant effects on the soil faunal composition. (2) The total number, density and diversity of soil fauna decreased with the increasing above sea level along the elevation gradients. The total fauna number (17) and density at ALM (25925.4 individual/m²) were less than those at EVB (24 and 56195.9 individual/m²). Density-Group (DG) Index at the four sites ranked as EVB (6.238) > COF (4.015) > DWF (2.124) > ALM (1.754) ($P<0.05$). The abundance of dominated groups e. g. Mites ($F=9.25$, $P<0.01$), Collembolans ($F=5.93$, $P<0.05$), Eiymentoptera ($F=6.35$,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30670313); 林业公益项目 (200804006; 200704005/wb02); 西南林业大学生态学重点建设学科项目 (XKX200902)

收稿日期: 2009-08-31; **修订日期:** 2010-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hruan1690@yahoo.com

$P < 0.001$), Coleoptera ($F = 4.42$, $P < 0.05$), and Symphyla ($F = 2.96$, $P < 0.05$) descended across the elevation gradients. (3) Soil fauna mostly distributed at the surface soil layer across the elevation gradients. The individuals of Eiymentoptera, Diptera, Collembolans, and Isopoda, however, mostly assembled in 10—25 cm soil at ALM, which might be derived from some soil faunal groups moving from surface to deeper layer, avoiding the unfavorable climate surroundings at higher altitudes. (4) Temporal patterns of soil faunal number and individuals fell in two groups across the elevation gradient: (a) Peak values of the soil fauna were in the autumn at sites of EVB and COF, (b) Individuals of the soil fauna mostly distributed in the summer at sites of DWF and ALM. Our results indicated that the structure and makeup of the faunal community might be important response processes along an elevation gradient in the Wuyi Mountains. The number, density, and diversity decreased significantly, which supply some data for soil faunal distribution study in subtropics and some aides in understanding of soil faunal response to altitude changes.

Key Words: elevation; soil fauna; vegetation; biodiversity; Wuyi Mountains

土壤动物作为生态系统的基本功能组分^[1],对土壤生态系统的物质循环和能量流动^[2-4],以及地上植物群落的结构、功能和演替起着重要调控作用^[5]。不同植被类型不仅会形成土壤生态系统明显不同的物质能量输入,而且会导致土壤动物物理环境和营养环境的改变,这必然会影响到不同样地土壤动物群落的结构与动态^[6-7]。20 世纪 80 年代以来,我国在热带^[8-9]、亚热带^[10-13]和温带^[14-16]三大气候带开展的土壤动物研究,不同程度涉及到不同植物类型(海拔差异)与土壤动物的相互关系^[17-18],但关于中国东南部典型地貌-武夷山山地不同植被类型土壤动物群落的研究,还未见报道。

地处中亚热带的福建省武夷山国家自然保护区,沿海拔梯度山体水热因子组合存在着显著的差异,植被类型随之呈明显的垂直地带性分化^[19-20]。本文以位于福建省武夷山 4 个不同海拔梯度的代表性植被为实验样地,研究土壤动物群落结构沿海拔垂直梯度上的变化,有助于理解植被、气候和土壤等环境因子变化对土壤生物多样性的影响过程与机理,能为中亚热带森林植被恢复与重建及土壤生物多样性保护提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 自然概况

研究试验地设在福建省武夷山国家自然保护区,地处福建省西北部的武夷山脉脊部(27°33'—27°54'N, 117°27'—117°51'E)。气候属于典型的中亚热带湿润季风气候。年均气温 12—18℃,年均相对湿度 82%—85%,年均雾日 100d 以上,年均降水量 2000 mm 左右。拥有世界同纬度带现存面积最大及保存最完整的中亚热带常绿阔叶林生态系统;典型的地带性植被类型为常绿阔叶林群落,自然资源丰富。境内以黄岗山为主峰,海拔高 2158 m,属东南大陆最高峰^[19-21]。福建省武夷山经纬方向垮度较小,植被类型无明显的水平变化。但在其垂直方向,从最低海拔 350 m 至最高海拔的黄岗山顶峰 2158m,相对高差 1800 m,存在显著的水热垂直梯度变化,随海拔高度的升高地上植物群落发生了明显的变化^[20]。

1.2 样地概况

试验选择武夷山植被垂直带谱中有代表性的 4 个植物群落作为实验样地,依次为:

(1)常绿阔叶林(Evergreen broadleaf forest, 简称 EVB) 海拔 500 m,年均气温 17—19℃,年均降水量 1 700mm 左右。植被类型为米槠林(*Castanopsis carlesii*)群落,复层林结构,种类组成复杂,优势种是米槠(*Castanopsis carlesii*),混有少量甜槠(*Castanopsis eyrei*)、木荷(*Schima superba*)和黄杞(*Engelhardia fenzelii*)等;乔木层平均胸径 9.2 cm,林冠较高,郁闭度较大;土壤为山地红壤,土层厚(≥ 80 cm),上覆盖枯枝落叶 3—4cm。

(2)针叶林(Coniferous forest, 简称 COF) 海拔 1200 m,年均气温 13—18℃,年均降水量 2000 mm 左右。植被类型为黄山松(*Pinus taiwanensis*)-肿节竹(*Oligostachyum oedogonatum*)群落,林相较整齐,种类组成简单,上层以黄山松为主,黄山松林平均胸径为 22cm;下层肿节竹较多,有少量木荷(*Schima superba*)、甜槠

(*Castanopsis eyrei*) 和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等;土壤为山地黄红壤,土层较厚(35cm左右),表层多细根,上覆盖枯枝落叶 5—7 cm。

(3) 亚高山矮林(Dwarf forest, 简称 DWF) 海拔 1800 m, 年均气温 11—13℃, 年均降水量 2200 mm 左右。植被类型为白檀(*Symplocos paniculata*)群落,以落叶树种为主,树干常扭曲,较矮小,有紫茎(*Stewartia sinensis*)、合轴荚蒾(*Viburnum sympodiale*)、华山矾(*Symplocos chinensis*)、白檀(*Symplocos paniculata*)和铁杉(*Tsuga heterophylla*)等;土壤为山地黄壤,土层厚(≥ 70 cm),上覆盖枯枝落叶 4—5 cm。

(4) 高山草甸(Alpine meadow, 简称 ALM) 海拔 2100 m, 年均气温 5—8℃, 年均降水量 3100 mm 左右。植被类型为青茅(*Calamagrostis brachytricha*)群落,群落结构非常简单,以禾本科青茅(*Calamagrostis brachytricha*)为主,另有少量芒(*Miscanthus sinensis*)、石松(*Lycopodium clavatum*),还有零星的灌木树种分布,主要有波叶红果树(*Stranvaesia davidiana*)、猫儿刺(*Mahonia foetida*)、云锦杜鹃(*Rhododendron fortunei*)等;土壤为高山草甸土,土层较薄(25 cm 左右),上覆盖枯草 1—2 cm。

1.3 研究方法

1.3.1 采样

从 2007 年 6 月至 2008 年 4 月,每 2 月定期取样。在 4 个植物群落的样地中,任取 3 个采样点,小心去除凋落物层,沿土壤剖面按 0—10cm, >10—25cm, >25—40cm 分层取样,尽量减少对土壤动物的扰动。样点采样面积为 20 cm × 40cm。每个采样点分 3 层取土,用于手拣法收集大型土壤动物,然后在 3 个采样点的剖面上分层用 100cm³ 环刀各取土样 1 个,用于干漏斗法(Tullgren)收集土壤动物。每次取样时,每个海拔样地取 9 个土样,4 个样地共土样 36 个,1 个采样周期共采土样 216 个。

1.3.2 分离与鉴定

采用改良的 Tullgren 漏斗分离装置^[22]进行土壤动物分离,时间为 24h。装置使用 20 盏 60W 的白炽灯,一次同时进行 20 个样品的分离。每层取出土样 300g 放入筛网中,下面放置盛有酒精(75%)的接样器。收集的样品带回实验室进行镜检。

土壤动物鉴定依据《中国土壤动物检索图鉴》^[23],《昆虫分类》(上、下)^[24]等参考书目,在解剖镜及 Olympus 体视显微镜(SZ-1145)下鉴定和计数。

1.3.3 数据处理

采用密度-类群指数、Jaccard 相似性指数和 Gower 系数计算样地中土壤动物群落多样性和相似性。(1) 密度-类群指数(DG)^[11]: $DG = (g/G) \times \sum (D_i/D_{i\max})$, 式中, g 为要测度的某群落类群数, G 为总类群数, D_i 为第 i 类群的密度, $D_{i\max}$ 为所有群落中第 i 类群的最大密度;

(2) Jaccard 相似性指数 q : $q = c/a + b - c$, 式中 c 为两群落的共有类群数, a 和 b 分别为群落 A 和群落 B 的类群,最大相似值为 1;

(3) Gower 系数 $Sg = 1/n \sum [1 - (|x_{ij} - x_{ik}|)1/R_i]$, 式中, n 为两个群落相比较的类群数, x_i 为第 i 类群的个体数, j 和 k 代表两个不同的群落, R_i 是第 i 类群在 j 和 k 群落的个体总数,最大相似值通常只有 0.85。 t 检验、方差分析和相关分析均在 SPSS 11.0 软件上进行。

2 结果

2.1 土壤动物群落的组成

研究期间的 6 次调查,从武夷山 4 个不同海拔高度样地中共捕获土壤动物 25 类 5137 只个体,隶属 2 门、8 纲、25 目(表 1)。其中,中小型土壤动物占各样地总数的 77%—85%, 蜱螨目(Acarina)和弹尾目(Collembola)占各群落样地中土壤动物相对丰度的 60% 以上,成为共有优势类群,并且所有样地中蜱螨目数量远高于弹尾目,其优势度较为显著。大型土壤动物占各样地总数的 15%—23%, 其中膜翅目(Eiymenoptera)、双翅目(Diptera)、鞘翅目(Coleoptera)、综合目(Symphyla)、等足目(Isopoda)和蜘蛛目(Araneae)为常见类群。优势类群和常见类群捕获数占总捕获数的 95.66%, 为 4 个样地中土壤动物群落的主

体。其余 17 类动物类群在群落中的相对多度小于 1%,为稀有类群。其中膜翅目、双翅目和鞘翅目为 4 个群落样地中的共有常见类群。而综合目为针叶林、亚高山矮林及高山草甸的常见类群;等足目为常绿阔叶林和针叶林的常见类群;蜘蛛目为亚高山矮林及高山草甸的常见类群。

表 1 不同海拔样地土壤动物类群组成/(只/m²)

Table 1 Abundance and groups of soil fauna communities at the four sites

类群 Groups	体型 Body size	常绿阔叶林 EVB		针叶林 COF		亚高山矮林 DWF		高山草甸 ALM	
		密度 <i>D</i>	/%	密度 <i>D</i>	/%	密度 <i>D</i>	/%	密度 <i>D</i>	/%
后孔寡毛目 Oligochaetaopisthopora	大	54.2 ^a	0.01	33.1 ^b	0.07	58.3 ^a	0.17	75 ^c	0.29
原尾目 Protura	中小	233 ^a	0.41	267 ^a	0.54	165 ^b	0.47	64 ^c	0.25
缨翅目 Thysanoptera	大	110 ^a	0.20	300 ^b	0.61	156 ^a	0.45		
弹尾目 Collembola	中小	11260 ^a	29.04	10300 ^b	20.88	7567 ^c	21.62	7500 ^a	28.93
双尾类 Diplura	大		28		0.06				
双翅目(幼虫) Diptera	大	2400 ^a	4.27	934 ^b	1.89	1364 ^c	3.92	1900 ^d	7.33
膜翅目 Eiymentoptera	大	4100 ^a	7.30	1833 ^b	3.72	1166 ^c	3.33	634 ^d	2.45
等翅目 Isoptera	大	298 ^a	0.53	200 ^a	0.41	33 ^b	0.09		
鞘翅目 Coleoptera	大	1968 ^a	3.50	1864 ^b	3.78	962 ^c	2.75	133 ^d	0.51
同翅目 Homoptera	大	290 ^a	0.51	200 ^a	0.41	134 ^b	0.38	106 ^b	0.41
直翅目 Orthoptera	大	34	0.06						
半翅目 Hemiptera	大	5.5	0.01	2.6	0.01				
蜚蠊目 Blattoptera	大	205.2 ^a	0.37	134 ^b	0.27	113.1 ^b	0.32	32.6 ^c	0.13
啮目 Psocoptera	大	363 ^a	0.65	197 ^b	0.40	32 ^c	0.09	59 ^c	0.23
鳞翅目(幼虫) Lepidoptera	大	256.5 ^a	0.46	242.7 ^a	0.49	32.3 ^b	0.09	28 ^b	0.09
伪蝎目 Pseudoscorpiones	大	366	0.65	132	0.27	189	0.54	165	0.64
盲蛛目 Opiliones	大	128 ^a	0.23	28 ^b	0.06				
蜱螨目 Acarina	中小	31634 ^a	56.29	30664 ^b	65.16	21767 ^c	62.19	12731 ^d	49.11
蜘蛛目 Araneae	大	534 ^a	0.95	308 ^b	0.62	364 ^b	1.14	526 ^a	2.13
四踢栈目 Tetramerocerata	中小	97 ^a	0.17	35 ^a	0.07	26 ^a	0.07	230 ^b	0.89
等足目 Isopoda	大	767 ^a	1.36	550 ^b	1.11	300 ^c	1.06	166.5 ^d	0.64
综合目 Symphyla	中小	400 ^a	0.52	740 ^b	1.50	431 ^a	1.23	1467 ^c	5.66
倍足纲 Diplopoda	大	37.5 ^a	0.07	41.7 ^a	0.08	75 ^a	0.21	108.3 ^b	0.42
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	大	420 ^a	0.75	300 ^b	0.61	67 ^c	0.19		
地蜈蚣目 Geophilomorpha	大	235	0.42						
合计 total		56195.9 ^a	100	49334.1 ^b	100	35001.7 ^c	100	25925.4 ^d	100

注:同行内不同小写字母表示样地间差异显著($P<0.05$)

2.2 土壤动物群落垂直分布

由表 1 可知,随着植被沿海拔高度的变化,土壤动物群落的类群总数和密度发生了相应变化。其中 4 个实验样地土壤动物的类群总数和总密度大小顺序依次为:EVB > COF > DWF > ALM ($P<0.05$)。常绿阔叶林中动物类群总数最多,共 24 个类群,高山草甸最少,只有 18 个类群,其它几个阶段类群总数都比较接近。常绿阔叶林土壤动物的密度与高山草甸之间存在极显著的差异($P<0.05$)。

不同生态习性的土壤动物在不同海拔高度样地中的分布存在一定差异性。在 4 个海拔的自然梯度中,常绿阔叶林中具有热带性特征的大型动物膜翅目、缨翅目、等翅目、盲蛛目和唇足纲等土壤动物类群显著高于高山草甸,主要分布于温带性环境的中小型动物综合目和倍足纲大型动物类群密度大小顺序为 ALM > COF > DWF > EVB ($P<0.05$),其中综合目动物类群在高山草甸中的密度分别是常绿阔叶林、针叶林、亚高山矮林的 3.67、1.98、3.4 倍;常绿阔叶林中数量占优势的中小型动物类群蜱螨目(31634 条/m²)显著高于高山草甸(12731 条/m²),弹尾目的密度约是高山草甸的 2 倍;大型动物蜘蛛目的个体密度大小为 EVB > ALM > DWF

> COF,但其个体数量在常绿阔叶林与高山草甸,以及针叶林与亚高山矮林之间的分布无统计上差异($P > 0.05$)。

4个样地中,土壤动物群落的类群总数和总密度在土壤不同剖面的分布存在显著差异($P < 0.05$),均呈明显的“表聚现象”(图1)。但是,每一土层土壤动物类群总数和总密度在不同海拔高度上的变化趋势有很大差异。其中0—10cm土层中土壤动物类群总数大小顺序为:常绿阔叶林>针叶林>亚高山矮林>高山草甸($P < 0.05$);>10—25cm土层中则大体表现相反:高山草甸=亚高山矮林>常绿阔叶林>针叶林($P > 0.05$);>25—40cm土层中高山草甸>常绿阔叶林>亚高山矮林>针叶林($P < 0.05$)。不同样地土壤动物群落总密度在不同土层中的分布比例也存在明显差异。在针叶林群落中,0—10cm土层中土壤动物数量是>10—25cm土层的3.82倍;而在高山草甸中的数量仅为1.11倍,表明针叶林中土壤动物表层聚集现象比较明显,而高山草甸中土壤动物则趋向于深层分布。

2.2.2 不同土壤动物类群的密度

不同土壤动物类群在土壤中具有不同的垂直分布特点。以数量较多的类群为例,常绿阔叶林中膜翅目和蜘蛛目等土壤动物类群主要分布在0—25cm土层中,>25cm土层中几乎未见分布。蜚蠊目、弹尾目、膜翅目、双翅目、综合目和蜘蛛目等土壤动物类群在0—15cm的土层中数量超过60%,其中综合目和蜘蛛目大于80%,表层聚集特征明显。在0—15cm土层中,鞘翅目和等足目个体数量只占50%左右,表层聚集现象不明显(图2)。

黄山松针叶林中蜘蛛目和综合目的数量主要分布在0—10cm土层中(大于90%),>25cm土层中未见分布;弹尾目在>25cm土层中数量极少;除鞘翅目外,蜚蠊目、弹尾目、膜翅目、双翅目、综合目、等足目和蜘蛛目类群在0—10cm土层中数量大于70%以上,表层聚集极明显(图3)。

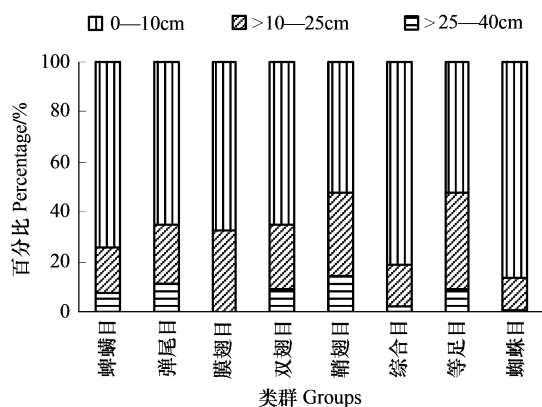


图2 常绿阔叶林数量占优势的动物类群数量垂直分布

Fig.2 Abundance of dominating faunal groups in the three layers at EVB

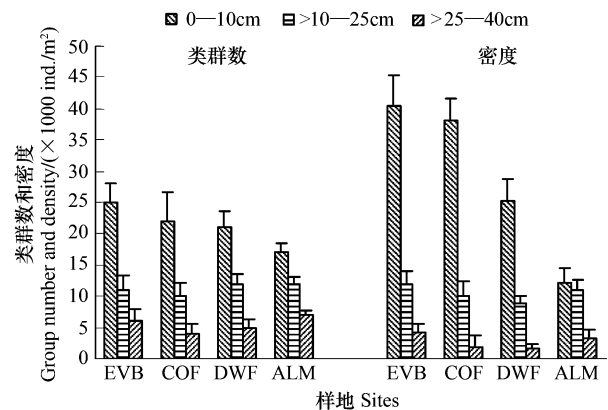


图1 不同样地土壤动物总类群数和总密度的垂直分布

Fig.1 Total group number and density of soil fauna in the three layers across the four sites

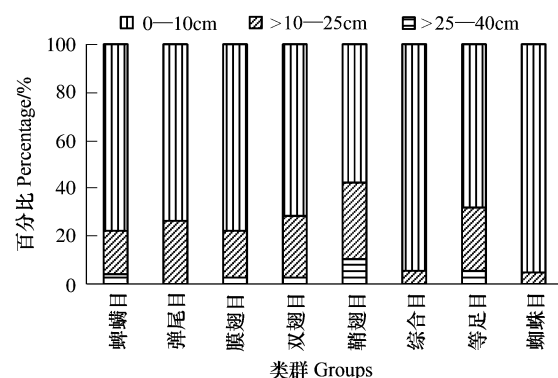


图3 针叶林数量占优势的动物类群数量的垂直分布

Fig.3 Abundance of dominating faunal groups in the three layers at COF

亚高山矮林中膜翅目、双翅目、等足目和蜘蛛目等土壤动物类群分布在0—25cm土层中,>25cm土层中没有分布;综合目土壤动物主要分布于0—10cm土层中,在>10—25cm的土层中未见分布;在0—10cm土层

中,除等足目外,蜚蠊目、弹尾目、膜翅目、双翅目、综合目和蜘蛛目等动物类群的数量均大于 70%,表层聚集明显(图 4)。

高山草甸中鞘翅目、综合目、等足目和蜘蛛目土壤动物均分布在 0—25cm 的土层中, >25cm 土层中未见分布。在 0—10cm 的土层中,蜚蠊目、蜘蛛目等动物数量大于 50% 以上,表层聚集明显;在 0—10cm 的土层中,弹尾目、膜翅目、双翅目和等足目等动物数量小于 40%,而主要分布于 >10—25cm 土层中,不存在表层聚集现象;在 0—10cm 土层中,鞘翅目和综合目的动物数量也只在 50% 上下(图 5),表层聚集不明显。

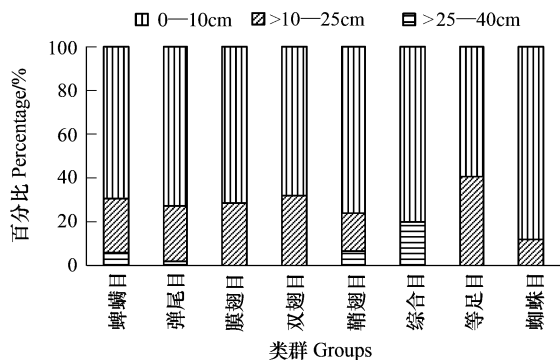


图 4 亚高山矮林数量占优势的动物类群数量的垂直分布

Fig. 4 Abundance of dominating faunal groups in the three layers at DWF

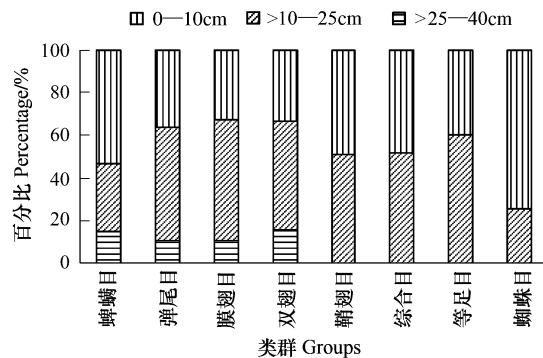


图 5 高山草甸数量占优势的动物类群数量垂直分布

Fig. 5 Abundance of dominating faunal groups in the three layers at ALM

2.3 不同月份土壤动物群落的结构变化

土壤动物群落每月出现的类群总数大小依次为:8 月份 > 6 月份 > 10 月份 > 4 月份 > 12 月份 > 2 月份,但不同样地中类群总数具有不同的时间变化模式(图 6)。常绿阔叶林 10 月份和 6 月份出现的类群总数最高,2 月份最低;黄山松针叶林 4 月份和 6 月份出现的类群总数最高,10 月份和 12 月份最低;亚高山矮林和高山草甸 8 月出现的类群总数最高,2 月最低。

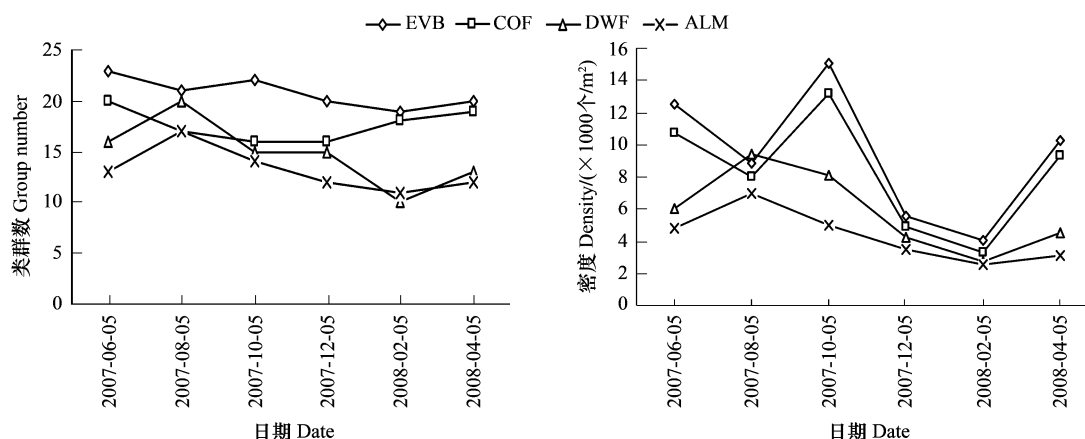


图 6 不同海拔样地土壤动物类群总数和总密度的时间变化

Fig. 6 Temporal distribution of total faunal group number and density in the four sites

土壤动物总个体数量变化表现为:10 月份 > 6 月份 > 8 月份 > 4 月份 > 12 月份 > 2 月份,但不同样地土壤动物个体数量具有不同的时间变化趋势(图 6)。土壤动物群落沿海拔高度的时间变化总体上可划分为 2 种类型:(1)秋季大量发生,包括常绿阔叶林(42.46%)和针叶林(43.02%);(2)夏季大量发生且数量接近,包括亚高山矮林和高山草甸。同时,对相关变量进行方差齐性检验,满足方差分析的前提条件。进一步方差

分析表明,土壤动物数量在不同样地、不同取样深度和不同月份之间均存在显著差异或极显著差异($P < 0.01$ 和 $P < 0.05$),不同样地与取样深度、取样深度与月份以及样地、取样深度与月份之间交互作用不显著(表 2)。

表 2 土壤动物数量的 3 因素(样地类型、深度和时期)方差分析的 F 值

Table 2 Three-factor ANOVA table of F -values of the effect on soil fauna in the four sites

因素 Factors	自由度 df	动物总个体数 Total density	类群数 Group number	螨类 Mites	跳虫 Collembola	其它 Others
样地 Sites	3	8.442 **	17.381 ***	9.099 ***	1.498 ns	5.484 **
深度 Depth	2	33.081 ***	539.093 ***	33.741 ***	13.477 ***	35.332 ***
时期 Date	5	2.493 ns	3.201	2.537	2.207 ns	2.422
样地 × 深度 Sites × Depth	6	12.982 ***	29.214 ***	9.805 ***	7.756 ***	11.799 ***
样地 × 时期 Sites × Date	15	1.536 ns	1.220 ns	1.415 ns	2.396 *	2.230 *
深度 × 时期 Depth × Date	10	5.060 ***	0.931 ns	3.895 **	6.346 ***	3.403 **
样地 × 深度 × 时期 Sites × Depth × Date	30	0.609ns	1.438ns	1.221ns	0.975ns	0.402ns

***: $P < 0.001$, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$, ns: $P > 0.05$

2.4 不同海拔高度土壤动物群落的多样性与相似性

采用密度-类群指数计算群落多样性,4 个植被群落中 DG 指数常绿阔叶林(6.238) > 针叶林(4.015) > 亚高山矮林(2.124) > 高山草甸(1.754) ($P < 0.05$)。由表 3 可知,4 个样地之间土壤动物群落的相似性,若只考虑群落组成的类群,Jaccard 相似性系数(q) 在 0.8000—0.8696 范围内,常绿阔叶林、针叶林和亚高山矮林等 3 个林地的土壤动物群落极为相似,以针叶林和亚高山矮林间相似性程度最高;常绿阔叶林与高山草甸以及针叶林与高山草甸的 q 值在 0.75 范围内,土壤动物群落为中等相似。但若加入个体数量因素,以 Gower 系数(S_g) 表示,各样地间的相似值距离加大。常绿阔叶林与针叶林的 S_g 值最高,达到最高值(0.85) 的 78%,常绿阔叶林与亚高山矮林的相似值则下降到 61%,常绿阔叶林与高山草甸和针叶林与高山草甸的土壤动物群落下降到 50% 以下,而成为中等不相似。

表 3 4 个海拔样地土壤动物的 $q(S_g)$ 相似系数

Table 3 Similarity of soil fauna in the four sites in the Wuyi Mountains (q)

	常绿阔叶林 EVB	针叶林 COM	亚高山矮林 DWF	高山草甸 ALM
常绿阔叶林 EVB		0.8462(0.6605)	0.8000(0.5155)	0.6800(0.3631)
针叶林 COM			0.8696(0.5978)	0.7391(0.4123)
亚高山矮林 DWF				0.8500(0.5926)

括号内为 S_g 相似系数

3 讨论

3.1 不同海拔样地土壤动物群落的组成与结构

土壤动物群落特征主要由样地植被、土壤、小气候特点以及相关环境因子所决定,但也受调查和采集方法以及人为干扰程度等因素影响^[13]。

福建武夷山自然保护区地处中国东南部。随着海拔高度的上升,山体呈明显水热因子组合的变化梯度,植被类型分化也随之表现出显著的垂直地带性变化,土壤动物群落类群与数量发生了明显的变化。常绿阔叶林土壤动物的类群总数最为丰富(24 个类群),高山草甸的类群总数最少(17 个类群);常绿阔叶林中土壤动物群落的总数量也显著高于高山草甸。3 块森林样地 Jaccard 相似性系数范围在 0.8000—0.8696 之间, S_g 相似系数在 0.5155—0.6605 之间,土壤动物群落类群及其数量极为相似;常绿阔叶林与高山草甸、针叶林与高山草甸之间植被类型差别较大,从而形成土壤动物群落个体数量的差异性,导致 S_g 相似系数偏低。说明植被类型对土壤动物群落类群和数量的重要影响。

植被结构一方面通过改变微气候条件和土壤养分的空间分布而影响土壤动物的组成与密度,另一方面通

过形成多样化生境影响土壤动物群落的种类与组成^[25]。不同样地土壤动物组成与数量上的差异性可能会对生态系统物质循环和能量流动的生态学过程产生重要影响^[2-3]。沿海拔梯度升高,植被类型依次为亚热带常绿阔叶林,温带针叶林,寒温带亚高山矮林和温带草甸,因此,具有热带性特征的大型动物膜翅目、缨翅目、等翅目、盲蛛目和唇足纲等动物类群呈减少趋势,而主要分布于温带性环境的中小型动物综合目和倍足纲大型动物类群密度呈增加趋势。同时,常绿阔叶林每平方米高达 5 万多只,土壤动物密度远高于其它几个植被群落。表明常绿阔叶林结构层次比较复杂,凋落物的质量与组成十分丰富,林内及土壤温湿度等自然环境相对稳定,具有良好的微气候条件,从而对栖息于其中的土壤动物群落产生重要的影响。另外,4 个不同植被类型中小型土壤动物占各样地总数的 77%—85%,大型土壤动物占各样地总数的 15%—23%,这与亚热带地区其它不同植被类型土壤动物群落的研究结果基本一致^[26-29]。不同海拔高度数量上占优势的土壤动物类群密度(蜚蠊目、弹尾目、膜翅目、双翅目、综合目、蜘蛛目和等足目等)所占各样地总数量比例的不同分布模式。说明植被、气候和土壤因素的差异性一定程度上决定土壤动物类群、功能群和种群等组织水平上的相互作用方式及适应性^[30-31],从而形成土壤动物类群组成与数量的分布格局。

不同植被群落样地的土壤环境因子对土壤动物群落组成产生直接或间接影响。武夷山相关研究表明,沿着海拔梯度的升高样地温度、土壤温度和凋落物数量呈减少趋势,与土壤动物类群总数、总密度和多样性随海拔升高逐渐减少的研究结果一致,表明这些因素对土壤动物群落的垂直分布有关键性的影响;相反,土壤湿度、总有机碳含量、全氮含量和全磷含量等沿海拔递升高逐渐增加^[32-34],与土壤动物群落多样性随之递减的研究结果不一致,表明这些因素不是决定土壤动物群落结构沿海拔变化规律的关键性因素。

本次调查采集到武夷山不同植被类型中土壤动物类群数与亚热带其它研究大体一致,基本反映了武夷山土壤动物的组成情况。但目前土壤动物研究受各种因素的限制,取样和分离方法对所采集土壤动物的类群与数量有一定的影响,在多大的面积上、采用何种分离方法获得最多类群与数量,有待研究。另外,人类活动对武夷山环境的形成和发展具有一定的影响。武夷山自然保护区大部分自然植被得到了及时有效的保护,但人类旅游活动对该地区土壤动物结构与动态的影响,有待于深入分析。

3.2 植被沿海拔梯度变化对土壤动物群落时空变化的影响

样地的植被结构、凋落物质与量和土壤理化性质决定土壤动物垂直结构(包括不同海拔和土壤层)的相对稳定性,不同季节降雨和气温变化导致土壤温湿度的改变是土壤动物群落垂直结构分异和动态性的主要影响因子。4 个海拔样地中土壤动物群落总类群数、总密度以及主要类群的数量在各土层中的垂直分布基本相似,这一现象与大多数土壤动物研究结果相类似^[35-38]。但土壤动物在土壤中的垂直分布呈现一定的样地差异性。主要体现在相同层次土层土壤动物组成与密度的样地差异性,以及数量占优势的土壤动物类群在不同土层数量构成的样地差异性,体现了不同样地特征对土壤动物垂直结构的影响。另外,高山草甸与常绿阔叶林土壤动物在 10—25cm 和 25—40cm 土层中土壤动物数量存在的显著差异性,可能是高海拔地带中一些土壤动物类群为避开土壤表层不利气候条件向较深土层迁移,从而形成土壤动物在不同海拔土壤中的不同垂直分布格局。

土壤动物群落存在一定的时间变化^[39-42]。气温和降雨量的季节变化从总体上影响着土壤动物群落的季节变化,常绿阔叶林和针叶林土壤动物数量在秋季大量发生,这与武夷山低海拔地带秋季气温不是很高,降雨量适中密切相关,而高海拔地带土壤动物数量增长往往受低气温的限制,因此,亚高山矮林和高山草甸土壤动物在夏季大量发生。干季和雨季的土壤温度、降雨量和日照等环境因子的明显变化,未能对土壤动物数量产生急剧的影响^[32],表明森林具有一定的恒温恒湿效应,减弱了外界环境变化对土壤动物群落的影响。

3.3 植被沿海拔梯度变化对土壤动物群落多样性变化的影响

密度-类群 *DG* 指数同时考虑了生物类群的丰富度,宜用于比较分类范围较大的土壤动物群落间的多样性^[26]。本次研究中土壤动物只鉴定到高级分类阶元,选用密度-类群 *DG* 指数来比较不同样地土壤动物群落多样性较为适宜。研究表明,4 个典型植被群落中土壤动物群落多样性 *DG* 指数 ($F = 14.32, P < 0.001$)

常绿阔叶林(6.238) > 针叶林(4.015) > 亚高山矮林(2.124) > 高山草甸(1.754), 不同样地土壤动物群落多样性之间存在显著差异。

生境复杂的样地有利于不同生态位土壤动物类群的发展, 因而土壤动物群落多样性较高; 生境比较简单的样地, 只有利于少数几个动物种群的增长, 同时由于缺少竞争, 极易产生优势种群, 整个群落的多样性则较低。亚热带常绿阔叶林为武夷山地带性植被, 结构层次复杂, 水热条件较好, 形成较适宜的小气候, 因而土壤动物群落丰富度与多样性最高; 黄山松针叶林结构相对简单, 林内凋落物层较厚, 参与养分循环的土壤动物主要集中在凋落物层, 因而土壤动物群落类群数组成也较为丰富, 丰富度与多样性比较高; 亚高山矮林群落结构简单, 林内凋落物少且分布不均匀, 土壤动物受栖息环境条件的制约, 其丰富度与多样性较低; 高山草甸无典型的凋落物层, 平均气温较低, 土壤动物类群和个体数量都最少, 多样性也是最低的。因此, 采用 *DG* 动物多样性指数的下降趋势, 即常绿阔叶林 > 针叶林 > 亚高山矮林 > 高山草甸 ($P < 0.05$), 来描述武夷山土壤动物沿着海拔梯度的变化是合理的。

References:

- [1] James C N, Walter G W, Marek K. Soil land litter microarthropod populations from two contrasting ecosystems in semi-arid eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 1996, 32: 329-346.
- [2] Coleman D C, Crossley Jr D A, Hendrix P F. *Fundamentals of Soil Ecology*, second ed. San Diego: Academic Press, 2004.
- [3] Reichle D E. The role of soil invertebrates in nutrient cycling//Lohm U, Persson T, eds. *Soil Organism of Ecosystems*. *Ecological Bulletins*, 1997, 25: 145-155.
- [4] Jouquet P, Dauber J, Lagerlof J, Lavelle P, Lepage M. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32: 153-164.
- [5] Wang S J, Ruan H H. Feedback mechanisms of soil biota to aboveground biology in terrestrial ecosystems. *Biodiversity*, 2008, 16(4): 407-416.
- [6] 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: 1629-1633.
- [7] Laossi K R, Barot B, Carvalho D, Desjardins T, Lavelle P, Martins M, Mitja D, Rendeiro A C, Roussin G, Sarazin M, Velasquez E, Grimaldi M. Effects of plant diversity on plant biomass production and soil macrofauna in Amazonian pastures. *Pedobiologia*, 2008, 51: 397-407.
- [8] Liao C H. The Community of Soil Animal in Tropical Rain Forest in Jianfengling Mountain, Hainan Island, China. — Composition and characteristics of community. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (11): 1866-1872.
- [9] Yang X D, Tang J W. Soil arthropod communities in different successional tropical secondary forests in Xishuangbanna, SW China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 988-994.
- [10] Zhang Z H, Shen H M, Shao L L. Soil animal on south slope of west Tianmu mountain and results of its environment. *Journal of Hangzhou University*, 1986, 13(supp.): 54-63.
- [11] Liao C H, Li J X, Huang H T. Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 449-555.
- [12] Wang Z Z, Zhang Y M. A study on forest soil invertebrates of the natural protection area in Hengshan Mountains (Nanyue). *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(3): 205-213.
- [13] Lin Y H, Zhang F D, Zhang J Q, Ouyang X J, Mo D S, Zhou G Y. Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (10): 2616-2622.
- [14] Zhong W Y, Yin X Q, Chen P. Contrast study of soil animal in different type forest in Maoershan. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 1998, 30 (1): 69-74.
- [15] Tong F C, Wang Q L, Liu X S, Xiao Y H. Dynamics of soil fauna communities during succession process of secondary forests in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (9): 1553-1555.
- [16] Huang L R, Zhang X P. Community characteristics of mid-micro soil animals in cold temperate zone of the Daxingan Mountains, China. *China Journal Apply Environment Biology*, 2008, 14(3): 388-393.
- [17] Jiang P, Zhao G, Ye J, Cui G F, Deng H B. Structure of forest communities on the northern slope of Changbai Mountain and its variation along elevation gradients. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(6): 28-32.
- [18] Liu Y, Li X C. Comparison of tardigrade community structure along an altitude gradient. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 166-169.

- [19] He J Y, Li L H, Liu C D. Wuyishan Research Series. Xiamen: Xiamen University Press, 1994.
- [20] Wang J S, Song S M, Wu Y Y, Cheng T M. The records on Pyralidae insect in the Wuyi Nature Reservation. Beijing: Science and Technology Press, 2003.
- [21] Lin P, Ye Q H. Wuyishan vegetation research (1), Vegetation distribution in Huangshan Shan//Wuyi Science I. Fuzhou: Fujian Science and Technology press, 1983.
- [22] Yin W Y, Yang F C, Wang Z Z. Soil Arthropod of Subtropical China. Beijing: Science Press, 1992.
- [23] Yin W Y, Hu S H, Shen W F. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998.
- [24] Zheng L Y, Gui H. Insect Classification. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 1999.
- [25] Connell J H, Slatyer R O. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. American Naturalist, 1977, 111: 1119-1114.
- [26] Liao C H, Li J X. The succession and function of soil animal in the degenerate ecosystems of tropics and subtropics of China//Yu Z Y ed. Restoration ecology in the degenerate ecosystems of tropics and subtropics of China. Guanzhou: Guanzhou Science and Technology Press, 1997: 192-213.
- [27] Liao C H, Li J X. The community structure of soil animal in the tropics and subtropics of China// Yin W Y ed. Soil Animal of China. Beijing: Science Press, 2000: 77-100.
- [28] Xiong Y, Liu Q, Chen H, Peng S L. Leaf litter decomposition of monsoon evergreen broadleaved forest and dynamics and diversity of soil fauna community in Dinghu Mountain. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(10): 1120-1126.
- [29] Yi L, You W H, Song Y C. Soil animal communities in the litter of the evergreen broad-leaved forest at five succession stages in Tiantong. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 466-473.
- [30] Southwood T R E, Brown V K, Reader P M. The relationships of plant and insect diversities in succession. Biological Journal of the Linnean Society, 1979, 12: 327-348.
- [31] Siemann E, Tilman D, Haarstad J, Ritchie M. Experimental tests of the dependence of arthropod diversity on plant diversity. The American Naturalist, 1998, 152: 738-750.
- [32] Shi Z, Wang J S, He R, Fang Y H, Xu Z K, Quan W, Zhang Z X, Ruan H H. Soil respiration and its regulating factor along an elevation gradient in Wuyi mountain of southeast China. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(4): 563-568.
- [33] He R, Wang J S, Shi Z, Fang Y H, Xu Z K, Quan W, Zhang Z X, Ruan H H. Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5138-5143.
- [34] Zhou Y, Xu X G, Wang F, Ruan H H, Wang J S, Fang Y H, Wu Y Y, Xu Z K. Soil microbial biomass, respiration, and metabolic quotient along an altitudinal gradient in Wuyi Mountain of southeastern China. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 265-269.
- [35] Willis E O. Seasonal changes in the invertebrate litter fauna on Barro Colorado Island, Panama. Revista Brasileira de Biologia, 1976, 36: 643-657.
- [36] Yang X D, Tang J W. Soil arthropod communities in different successional tropical secondary forests in Xishuangbanna, S W China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15: 988-994.
- [37] Xu G L, Zhou G Y, Mo J M. Changes of soil fauna during forest restoration in subtropical China. Zoological Research, 2006, 27(1): 23-28.
- [38] Chen X N, You W H, Yi L. Community structure of soil fauna along an altitudinal gradient in Taibai Mountain of Tiantong Region, Zhejiang Province. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 270-276.
- [39] Fu B Q. A review on soil animal community in China. Bulletin of Biology, 1996, 31(12): 8-9.
- [40] Li C D, Xiao N N, Yang D R. The community component of soil animals on the tropical rain forest in Xishuangbanna. In: Yin W Y ed. Soil Animal of China. Beijing: Science Press, 2000: 100-105.
- [41] Liao C H, Li J X, Yang Y P, Zhang Z C. The community of soil animal in tropical rain forest in Jianfeng Mountain, Hainan Island, China: Relationship between seasonal change of community structure and climatic factors. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 139-147.
- [42] Wang S J, Cai Q J, Ruan H H. Soil nematode community response to vegetation restoration in northern Fujian. Biodiversity, 2007, 15(4): 356-364.

参考文献:

- [5] 王邵军, 阮宏华. 土壤生物对地上生物的反馈作用及其机制. 生物多样性, 2008, 16(4): 407-416.
- [8] 廖崇惠. 海南尖峰岭热带土壤动物群落——群落的组成及其特征. 生态学报, 2002, 22(11): 1866-1872.
- [9] 杨效东, 唐建维. 西双版纳不同演替状态热带次生林土壤节肢动物群落特征. 应用生态学报, 2004, 15: 988-994.
- [10] 张贞华, 沈海铭, 邵玲珑. 西天目山南坡土壤动物及其对环境的影响. 杭州大学学报, 1986, 13(增): 54-63.

- [11] 廖崇惠,李健雄. 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. 生态学报, 1997, 17(5): 549-555.
- [12] 王振中,张友梅. 衡山自然保护区森林土壤动物群落研究. 地理学报, 1989, 44(2): 205-213.
- [13] 林英华, 张夫道, 张俊清, 欧阳学军, 莫定生, 周国逸. 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, 2005, 25(10): 2616-2622.
- [14] 仲伟彦,殷秀琴,陈鹏. 帽儿山不同林型土壤动物的对比研究. 东北师大学报自然科学, 1998, (1): 69-74.
- [15] 佟富春,王庆礼,刘兴双,肖以华. 长白山次生林演替过程中土壤动物群落的变化. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1531-1535.
- [16] 黄丽荣,张雪萍. 大兴安岭寒温带地区中小型土壤动物群落特征. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3): 388-393.
- [17] 姜萍,赵光,叶吉,崔国发,邓红兵. 长白山北坡森林群落结构组成及其海拔变化. 生态学杂志, 2003, 22(6): 28-32.
- [18] 刘莹,李晓晨. 不同海拔缓步动物群落结构的比较. 生态学杂志, 2006, 25(2): 166-169.
- [19] 何建源,李凌浩,刘初钊. 武夷山自然保护区植被. 武夷山研究. 厦门:厦门大学出版社, 1994.
- [20] 汪家社,宋士美,吴焰玉,陈铁梅. 武夷山自然保护区蜈蚣科昆虫志. 北京:中国科学技术出版社, 2003.
- [21] 林鹏,叶庆华. 武夷山植被研究(一), 黄岗山的植被分布概要//《武夷科学》编辑委员会编. 武夷科学第一卷. 福州:福建科学技术出版社, 1983.
- [22] 尹文英,杨逢春,王振中. 中国亚热带土壤动物. 北京:科学出版社, 1992.
- [23] 尹文英,胡圣豪,沈温芬. 中国土壤动物检索图鉴. 北京:科学出版社, 1998.
- [24] 郑乐怡,归鸿. 昆虫分类(上、下). 南京:南京师范大学出版社, 1999.
- [26] 廖崇惠,李健雄. 热带、亚热带退化生态系统恢复过程中动物群落的演替与功能//余作岳等主编. 热带亚热带退化生态系统的恢复生态学. 广州:广东科技出版社, 1997, 192-213.
- [27] 廖崇惠,李健雄. 华南热带和亚热带森林土壤动物的群落结构//尹文英等著. 中国土壤动物. 北京:科学出版社, 2000: 77-100.
- [28] 熊燕,刘强,陈欢,彭少麟. 鼎湖山季风常绿阔叶林凋落叶分解与土壤动物群落动态和多样性. 生态学杂志, 2005, 24: 1120-1126.
- [29] 易兰,由文辉,宋永昌. 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, 2005, 25(3): 466-473.
- [32] 施政,汪家社,何容,方燕鸿,徐自坤,权伟,张增信,阮宏华. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子. 生态学杂志, 2008, 27(4): 563-568.
- [33] 何容,汪家社,施政,方燕鸿,徐自坤,权伟,张增信,阮宏华. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化. 生态学报, 2009, 29(9): 5138-5143.
- [34] 周焱,徐宪根,王丰,阮宏华,汪家社,方燕鸿,吴焰玉,徐自坤. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(qMB, qCO_2). 生态学杂志, 2009, 28(2): 265-269.
- [36] 杨效东,唐建维. 西双版纳不同演替状态热带次生林土壤节肢动物群落特征. 应用生态学报, 2004, 15(6): 988-994.
- [37] 徐国良,周国逸,莫江明. 南亚热带退化植被重建中土壤动物群落变化. 动物学研究, 2006, 27(1): 23-28.
- [38] 陈小鸟,由文辉,易兰. 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, 2009, 28(2): 270-276.
- [39] 傅必谦. 我国土壤动物群落学研究进展. 生物学通报, 1996, 31(12): 8-9.
- [40] 李朝达,杨大荣,肖宁年. 西双版纳热带雨林的土壤动物//尹文英等著. 中国土壤动物. 北京:科学出版社, 2000: 100-105.
- [41] 廖崇惠,李健雄,杨悦屏,张振才. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落——群落结构的季节变化及其气候因素. 生态学报, 2003, 23(1): 139-147.
- [42] 王邵军,蔡秋锦,阮宏华. 土壤线虫群落对闽北森林植被恢复的响应. 生物多样性, 2007, 15(4): 356-364.