

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第33卷第19期

2013年10月 (半月刊)

目次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 马凤娇, 刘金铜, A. Egrinya Eneji (5963)
- 非人灵长类性打搅行为研究进展 杨 斌, 王程亮, 纪维红, 等 (5973)
- 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响 韩群花, 郭 聪, 张美文 (5981)
- 食物链长度远因与近因研究进展综述 王玉玉, 徐 军, 雷光春 (5990)
- AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制 罗巧玉, 王晓娟, 李媛媛, 等 (5997)
- 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展 薛建福, 赵 鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 等 (6006)
- 圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征 张明春, 黄 炎, 李德生, 等 (6014)
- 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配 赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 等 (6021)
- 风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响 杨志宏, 吴庆明, 董海燕, 等 (6028)
- 白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征 李艳红, 关进科, 黎大勇, 等 (6035)
- 生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响 罗媛媛, 刘金亮, 黄杰灵, 等 (6041)
- 基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究
..... 吴文珊, 陈友铃, 孙伶俐, 等 (6049)
- 高榕榕果内 *Eupristina* 属两种榕小蜂的遗传进化关系 陈友铃, 孙伶俐, 武蕾蕾, 等 (6058)
- 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等 (6065)
- 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响
..... 杨延杰, 王晓伟, 赵 康, 等 (6074)
- 极端干旱区多枝桤柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应 马晓东, 王明慧, 李卫红, 等 (6081)
- 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等 (6088)
- 陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响 谭雪红, 郭小平, 赵廷宁 (6097)
- 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态 叶功富, 张尚炬, 张立华, 等 (6107)
- 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较 裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 等 (6114)
- AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等 (6121)
- 盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性 周家超, 付婷婷, 赵维维, 等 (6129)
- CO₂ 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响 师志冰, 周 勇, 李 夏, 等 (6135)
- 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响 孟 焕, 王雪宏, 佟守正, 等 (6142)
- 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (6147)
- 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等 (6154)
- 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例
..... 邱广龙, 范航清, 李宗善, 等 (6163)
- 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响 尹瑞平, 吴永胜, 张 欣, 等 (6173)
- 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局 韩 路, 席琳乔, 王家强, 等 (6181)
- 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响 宗 宁, 石培礼, 蔺 婧, 等 (6191)
- 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系 杨 帆, 王志春, 王云贺, 等 (6202)

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM _{2.5} 浓度及水溶性离子特征	肖以华, 李 炯, 旷远文, 等 (6209)
马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局	汪振华, 赵 静, 王 凯, 等 (6218)
黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化	陈云龙, 单秀娟, 周志鹏, 等 (6227)
三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态	李 娜, 张雪萍, 张利敏 (6236)
笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性	陈友铃, 陈晓倩, 吴文珊, 等 (6246)
海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估	陈 尚, 任大川, 夏 涛, 等 (6254)
中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标	郭子良, 崔国发 (6264)
生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响	易 扬, 信忠保, 覃云斌, 等 (6277)
华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性	王红梅, 王仲良, 王 堃, 等 (6287)
中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性	俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等 (6295)
中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应	盛茂银, 刘 洋, 熊康宁 (6303)
气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响	贺 伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等 (6314)
内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性	朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等 (6320)
黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应	马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等 (6328)
成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价	秦鱼生, 喻 华, 冯文强, 等 (6335)
大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 马军杰, 张 禹, 等 (6345)
夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用	林 峰, 陈 敏, 杨伟锋, 等 (6354)
北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子	石洪华, 王晓丽, 王 媛, 等 (6363)
植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响	王 丹, 吕瑜良, 徐 丽, 等 (6373)
油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性	孟翔翔, 狄晓艳, 王孟本, 等 (6382)
基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例	文 雯, 周宝同, 汪亚峰, 等 (6389)
基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例	施晓清, 李笑诺, 杨建新 (6398)
生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析	祁新华, 叶士琳, 程 煜, 等 (6411)
“世博”背景下上海经济与环境的耦合演化	倪 尧, 岳文泽, 张云堂, 等 (6418)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 464 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 55 * 2013-10



封面图说: 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区, 它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物, 它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖, 并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是, 生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明, 凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一, 在水分极度匮乏的荒漠生态系统, 它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305241166

李娜, 张雪萍, 张利敏. 三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态. 生态学报, 2013, 33(19): 6236-6245.

Li N, Zhang X P, Zhang L M. Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6236-6245.

三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态

李 娜, 张雪萍, 张利敏*

(哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘要:对帽儿山 3 种典型森林群落大型土壤动物进行了连续 6 个月的野外调查研究。通过系统分析, 共获得大型土壤动物 3604 只, 隶属于 3 门 6 纲 17 目 50 科。其中正蚓科(Lumbricidae)、线蚓科(Enchytraeidae)和石蜈蚣目(Lithobiomorpha)为优势类群, 常见类群 11 类。结果表明: (1) 水平分布上, 密度和生物量红松人工林最高, 其次为硬阔叶林, 蒙古栎林最少; 类群数硬阔叶林最多, 蒙古栎林最少; 香农指数和丰富度指数均为蒙古栎林最高, 红松人工林最低; 优势度指数与两者相反; 均匀度指数蒙古栎林最高, 硬阔叶林最低; (2) 垂直分布上, 个体密度、类群数及生物量均差异显著($P < 0.001$)。3 个样地大型土壤动物个体密度表聚性明显; 类群数红松人工林自凋落物层向下减少, 硬阔叶林和蒙古栎林 0—10 cm 最多; 生物量在 0—10 cm 土层最大; 香农指数随深度增加而减小, 优势度指数则相反; (3) 在时间变化上, 5 月和 10 月个体密度和类群数较多, 9 月生物量最大; 香农指数和优势度指数差异显著($P < 0.01$), 其他指数各月间无明显差异; (4) 与土壤环境因子关系上, 总有机碳含量与类群数、个体密度及生物量显著正相关, 容重与香农指数显著负相关; 典型对应分析结果表明, 不同类群大型土壤动物与环境相关性不同。

关键词:大型土壤动物; 森林生态系统; 群落结构; 多样性; 时空分布

Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests

LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin*

Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Geographical Science, Harbin Normal University, College of Heilongjiang Province, Harbin 150025, China

Abstract: Soil macro-faunas are important decomposers in ecosystem and play a significant role in nutrient cycling and energy flow. In Maoer Mountain, the soil macro-faunas were investigated in three typical forest types (Korean pine plantation forest, Hard-wood forest and Mongolian oak forest). Our object was to explore the community structure, spatial and temporal dynamic of soil macro-fauna, and its impact factors in temperate forest. Soil samples were collected from the litter layer and the soil layers at depth of 0—10 cm and 10—20 cm. Sampling was carried out continuously from May to October in 2012. A total of 3604 individuals, belonging to 3 Phyla, 6 Classes, 17 Orders and 50 families were extracted and identified. Among them, the Lumbricidae, Enchytraeidae and Lithobiomorpha were the dominant communities. The results showed that: (1) for horizontal distribution, the decreasing order of individual density and biomass was Korean pine plantation, Hard-wood forest and Mongolian oak. The group number of soil macro-faunas was the largest in Hard-wood forest, and the least in Mongolian oak forest. The Shannon and richness indices of soil macro-faunas were the highest in Mongolian oak forest and the lowest in Korean pine plantation forest, but the trend in the dominance index was opposite. The evenness index was the largest in Mongolian oak forest and the least in Hard-wood forest; (2) for vertical distribution, the individual density, group number, biomass and diversity of soil macro-fauna were significantly affected by the soil layer ($P < 0.001$). The individual density distribution appeared significant surface-aggregation, and the maximum biomass of soil macro-fauna was found at depth of 0—10 cm. The group number showed a decrease trend with the increasing layer in

基金项目: 国家科技部“十二五”科技支撑项目(2011BAD37B01); 国家自然科学基金项目(41101048); 国家自然科学基金项目(41071033)

收稿日期: 2013-05-24; 修订日期: 2013-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlmjhb@163.com

Korean pine plantation forest and that of highest value in both Hard-wood forest and Mongolian oak forest occurred at 0—10 cm depth, not the litter layer. The Shannon index decreased with the increasing soil depth, while the dominance index appeared the opposite trend; (3) the Shannon and dominance index of soil macro-fauna were significantly different among different months ($P<0.01$). Individual density and group number were higher in May and September than other months, and biomass of soil macro-fauna was the largest in September; (4) the correlation analysis showed that the individual density, group number and biomass of the soil macro-fauna were positively correlated with total organic carbon ($P<0.05$), there was the significantly negative correlation between the Shannon index and soil bulk density ($P<0.01$). It can be conclude that there was obviously spatial and temporal heterogeneity in soil macro-fauna community structure and the total organic carbon was one of the important impact factors.

Key Words: soil macro-faunas; forest ecosystem; community structure; diversity; spatial and temporal distribution

大型土壤动物(体长 >2 mm)个体大,种类繁多,数量巨大,是陆地生态系统重要消费者和分解者。它们通过自身的生存、活动和摄食行为调节土壤酶和微生物活性,参与土壤有机质分解和矿化,促进土壤腐殖质的形成,改善土壤结构和质量^[1-4],调控地表植物群落的结构和功能^[5];此外,其对环境变化敏感,常作为反映环境变化的指示生物^[6],在土壤生态系统物质循环和能量流动中起着至关重要的作用^[7]。目前,大型土壤动物日益引起了中外学者的高度关注,研究主要集中在动物区系组成、数量变化^[8-9]、多样性及其评价指标^[10]以及大型土壤动物与环境因素的相互关系^[11]等方面。

以往研究结果表明,大型土壤动物类群、密度、生物量和多样性等特征受气候、土壤和植被等因子的影响及调控^[12]。在森林生态系统中,植被组成对大型土壤动物起着决定性作用,即使同一土壤类型,在不同的空间上,不同植被类型也会通过改变土壤理化环境^[13],进而影响土壤动物群落的组成及结构。因此,土壤动物在森林生态系统中具有较大的空间异质性^[14]。同时,温带地区光照、温度、水分和植物群落的季节变化十分显著,导致不同群落大型土壤动物群落数量、组成及结构随环境因子的改变而发生季节性变化,因此温带大型土壤动物群落结构具有明显的时间动态。

处于中高纬度地区的东北森林是我国的重点林区,不仅在我国的生态环境建设和生物地球化学循环中具有举足轻重的作用,而且对于全球变化具有重要指示作用。与地上植物群落相比,地下大型土壤动物群落对气候变化更为敏感,因而能够更好地指示全球变化下温带森林生态系统结构与功能的演变特征和发展态势^[15]。陈鹏、殷秀琴和张雪萍等学者^[16-17]对于帽儿山大型土壤动物群落进行了大量细致的研究,但关于其时空动态及其主要环境影响因素的研究还相当薄弱。本研究以我国东北地区的帽儿山 3 种典型森林群落为研究对象,进行连续 6 个月的野外调查,目的在于探讨温带不同植被类型大型土壤动物群落结构特征、动态及其影响机制。对于理解该地区大型土壤动物区系组成及生态地理分布规律,及其在生态系统中的功能作用具有重要意义,并为合理利用和保护温带森林土壤生物资源及森林生态系统可持续发展提供理论依据。

1 研究区自然概况

研究样地设在黑龙江省尚志市东北林业大学帽儿山森林生态系统定位研究站($45^{\circ}24'N$, $127^{\circ}40'E$)。该地区气候为温带大陆性季风气候,冬季寒冷而漫长,夏季湿热而短促,年平均温度 $2.7^{\circ}C$,全年大于或等于 $10^{\circ}C$ 的积温为 $2638^{\circ}C$;早霜一般出现在 8 月末,晚霜一般在 5 月末止,无霜期约为 120—140 d;年降水量 600—800 mm,雨量集中于 7、8 月份;年蒸发量 1093 mm,年平均湿度 70%;地带性土壤为暗棕壤。帽儿山位于东北东部山地张广才岭余脉,平均海拔 300 m,平均坡度 10° — 15° 。植被属于长白植被区系,破坏后形成现今的次生林和人工林,代表着东北东部山区较典型的森林类型^[18-20]。本研究选取了该地区不同立地条件下经过不同干扰而形成的 3 种典型森林群落:红松人工林(湿度中等的山坡)、硬阔叶林(潮湿的山谷)和蒙古栎林(干旱的山脊)为研究对象,立地状况、植被组成及土壤理化性质见表 1^[18,20-21]。

2 研究方法

2.1 野外采样与室内鉴定

于 2012 年 5 月到 10 月,每月对 3 种典型森林群落进行取样调查,在每种林型中各设置 3 块 $20\text{ m}\times 30\text{ m}$ 样地,构成 3 个重复,按照多点混合取样法 3 点混合取样。分别对凋落物层、0—10 cm 和 10—20 cm 共 3 个层次取样,取样面积为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 。采用手拣法分离大型土壤动物,放入 75%酒精中固定,带回实验室在显微镜下进行分类鉴定。主要参考尹文英的《中国土壤动物检索图鉴》^[8],一般鉴定到科,个别鉴定到目或纲。统计土壤动物的类群和数量,同时将已鉴定的土壤动物洗净泥土,用滤纸吸干其表面的酒精,在分析天平上分别称量并记录鲜重。

2.2 数据分析

土壤动物的香农指数(H')、均匀度指数(E)、优势度指数(C)和丰富度指数(D) 根据如下公式计算^[22]:

表 1 3 种森林群落的自然环境特征^[18,20-21]

Table 1 Natural environment characteristics of the three forest communities (Mean±SE)

林型 Forest type	样地状况和优势植物组成 Site characteristics and vegetation composition				土壤性质 Soil properties				pH
	坡位 Location	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	优势种 Dominant species	土层/cm Soil layer	TOC /(g/kg)	TN /(g/kg)	BD /(g/kg)	
HS	中坡位	12	西北	红松 <i>Pinus</i>	0—10	70.9±2.4	4.17±0.45	0.75±0.07	6.18±0.67
	Mid slope		Northwest	<i>koraiensis</i>	10—20	49.4±3.9	2.70±0.37	1.02±0.13	6.04±0.48
YK	下坡位	7	北 North	水曲柳 <i>Fraxinus</i>	0—10	113.5±11.3	8.09±0.76	0.51±0.07	6.29±0.66
	Toe slope			<i>mandshuurica</i>	10—20	63.8±4.8	4.95±0.97	0.75±0.09	6.16±0.42
MGL	上坡位	23	南 South	蒙古栎 <i>Quercus</i>	0—10	88.7±6.2	5.04±0.68	0.36±0.06	5.80±0.39
	Upper slope			<i>mongolica</i>	10—20	55.6±3.9	2.01±0.33	0.80±0.09	5.96±0.41

HS:红松人工林 Korean pine plantation forest; YK:硬阔叶林 Hard-wood forest; MGL:蒙古栎林 Mongolian oak forest; TOC:土壤总有机碳 Total organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen; BD:容重 Bulk Density

Shannon-Wiener 多样性指数(H')

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

Pielou 均匀度指数(E)

$$E = H' / \ln S \tag{2}$$

Simpson 优势度指数(C)

$$C = \sum (P_i)^2 \tag{3}$$

Menhinick 丰富度指数(D)

$$D = \ln S / \ln N \tag{4}$$

式中, S 为所有类群数; P_i 为第 i 个种的多度比例; N 为所有类群个体数。

采用方差分析(ANOVA, *LSD*)检验立地条件、土层深度及取样时间对 3 种群落大型土壤动物群落指标的显著性影响;双变量相关分析方法分析环境因子和土壤动物群落结构参数和多样性指数的相关性;采用典范对应分析(CCA)对优势类群和常见类群的数量与土壤环境因子进行分析。所有数据分析与作图采用 SPSS19.0、Sigmaplot10.0 及 CANOCO 4.5 软件。

3 研究结果

3.1 大型土壤动物的群落组成及数量特征

对帽儿山 3 种森林群落的 6 次土壤取样,共获得大型土壤动物 59 类、3604 只,隶属于 3 门 6 纲 17 目 50 科,平均密度 29.66 只/m²(附表 1)。优势类群(>总个体数 10%) 3 类,分别为正蚓科(Lumbricidae)、线蚓科(Enchytraeidae)和石蜈蚣目(Lithobiomorpha),占总个体数的 55.66%;常见类群(占总个体数 1%—10%) 11 类,占总个体数的 38.89%;稀有类群(<总个体数 10%) 45 类,占总个体数的 5.43%,它们虽然数量少,但是类群较多(附表 1)。

3.2 大型土壤动物的水平分布

3 个样地中,硬阔叶林大型土壤动物类群最多(8.59 种/m²),但与红松人工林和蒙古栎林没有显著差异(表 2)。不同样地共有类群 21 类,其中正蚓科为 3 个样地共有优势种,线蚓科和石蜈蚣目在 3 个样地所占比重均较大,但同一类群在不同样地多度有所不同(附表 1)。此外,3 个样地均有各自的特有类群,盲蝽科(Miridae)、水龟甲科(Hydrophilidae)和扁甲科(Cucujidae)等只出现在红松人工林;只出现在硬阔叶林的类群为猎蝽科(Reduviidae)、剑虻科(Therevidae)和舞虻科(Empididae)等;蒙古栎林的特有类群为毛蠹科(Psychodidae)、阎甲科(Histeridae)、和木蠹蛾科(Cossidae)等(附表 1)。

不同样地大型土壤动物个体密度和生物量差异均不显著,其变化规律与土壤动物类群变化不同,均为红松人工林最大,蒙古栎林最小(表 2)。不同植物群落中,一些类群个体密度差别不大,如地蜈蚣目(Geophilomorpha)(6.28—9.48 只/m²),而一些类群在不同样地中个体密度差异较大($P>0.05$),如正蚓科在红松人工林个体密度达 14.05 只/m²,而在蒙古栎林个体密度仅 4.84 只/m²(附表 1)。不同类群土壤动物的生物量差别悬殊,总平均生物量为 27.88 g/m²;生物量最大的类群是正蚓科,其生物量占总生物量的 78.92%;单只个体生物量最大的是木蠹蛾科,生物量为 0.36 g,最小的为蓟马科(Thripidae),约 0.0001 g。

大型土壤动物多样性指数分析表明,不同群落各多样性指数均无显著差异(表 2), H' 指数和 D 指数表现为蒙古栎林>硬阔叶林>红松人工林; C 指数则正好相反,而 E 指数蒙古栎林最高(表 2)。

表 2 大型土壤动物群落指标时空分布特征

Table 2 The temporal and spatial variation character of soil macro-fauna community parameters (Mean±SE)

项目 Item	N /(只/m ²)	S	B (g/m ²)	H'	E	C	D
样地 Sites							
HS	33.78±4.73	8.07±0.41	1.69±0.27	1.36±0.05	0.80±0.02	0.35±0.02	0.62±0.02
YK	33.25±4.73	8.59±0.41	1.53±0.27	1.42±0.05	0.80±0.02	0.33±0.02	0.64±0.02
MGL	22.96±4.73	8.05±0.41	1.42±0.27	1.46±0.05	0.84±0.02	0.30±0.02	0.66±0.02
土层 Soil layer							
凋落物层 Litter layer	46.64±4.73A	10.12±0.41A	0.65±0.27B	1.58±0.05A	0.82±0.02	0.27±0.02B	0.64±0.02
0—10 cm	29.53±4.73B	8.77±0.41B	3.0±0.27A	1.46±0.05A	0.81±0.02	0.32±0.02B	0.63±0.02
10—20 cm	12.82±4.73C	5.83±0.41C	1.0±0.27B	1.20±0.05B	0.81±0.02	0.39±0.02A	0.65±0.02
月份 Month							
5 月 May	36.40±6.69B	9.98±0.58A	1.16±0.39B	1.65±0.08A	0.86±0.03	0.23±0.03B	0.68±0.03
6 月 June	17.98±6.69B	6.37±0.58C	1.49±0.39B	1.20±0.08B	0.76±0.03	0.41±0.03A	0.58±0.03
7 月 July	21.04±6.69B	7.46±0.58BC	0.71±0.39B	1.34±0.08B	0.81±0.03	0.35±0.03AB	0.64±0.03
8 月 August	20.74±6.69B	8.20±0.58B	0.93±0.39B	1.47±0.08AB	0.85±0.03	0.30±0.03B	0.67±0.03
9 月 September	23.56±6.69B	7.95±0.58B	3.62±0.39A	1.35±0.08B	0.80±0.03	0.35±0.03AB	0.65±0.03
10 月 October	58.27±6.69A	9.48±0.58AB	1.38±0.39B	1.48±0.08AB	0.80±0.03	0.31±0.03B	0.64±0.03
F 值 F-value							
样地 Sites	1.53	0.56	0.25	0.81	1.22	0.99	0.63
土层 Soil layer	12.80 ***	28.52 ***	21.53 ***	13.03 ***	0.15	6.92 **	0.14
月份 Month	5.33 ***	5.17 ***	7.48 ***	4.04 **	1.07	3.89 **	1.16
样地×土层 Sites×Soil layer	2.61 *	5.57 ***	0.64	3.78 **	0.53	2.37	0.48
样地×月份 Sites×Month	1.62	1.75	0.59	1.32	1.40	1.43	0.84
土层×月份 Soil layer×Month	3.64 ***	0.55	6.30 ***	1.21	1.83	1.30	1.46
样地×土层×月份 Sites×Soil layer×Month	1.44	1.04	0.86	1.29	1.06	1.13	0.94

同一列不同字母表示显著性差异组别($P<0.05$), *** $P<0.001$, ** $P<0.01$, * $P<0.05$; N : 个体密度; S : 类群数; B : 生物量; H' : 香农指数; E : 均匀度指数; C : 优势度指数; D : 丰富度指数

3.3 大型土壤动物的垂直分布

大型土壤动物个体密度、类群数及生物量在垂直方向上的分布差异均极显著($P<0.001$) (表 2)。个体密度在土层中的分布具有明显表聚性,但各生境的变化情况有所不同(图 1)。红松人工林中,大型土壤动物类群数沿凋落物层向下呈递减的趋势,而硬阔叶林和蒙古栎林 0—10 cm 土壤动物类群最多(图 1)。

不同土层深度,土壤动物类群组成存在差异,如一些类群广泛分布在各个土层,如正蚓科和线蚓科在各层土壤均为优势种,蜘蛛目(Araneida)、马陆目(Juliformia)、隐翅甲科(Staphylinidae)和步甲科(Carabidae)在各层均为常见种;一些类群则集中分布于特定土层,如蝽科(Pentatomidae)、郭公甲科(Cleridae)和胡蜂科(Vespidae)仅出现在凋落物层,而扁甲科、虎甲科(Cicindelidae)和芎马科等仅出现在 0—10 cm 土层。红松人工林凋落物层个体密度显著高于其它两层,而硬阔叶林和蒙古栎林凋落物层与 0—10 cm 土层无显著差异(图 1)。不同类群土壤动物个体密度在垂直方向上变化规律也不尽相同,金龟甲科(Scarabaeidae)随深度增加而增加,步甲科、腹足纲(Gastropoda)和蚋科(Siliidae)等随深度增加而减小,而长足虻科(Dolichopodidae)在各层的密度大致相当。

0—10 cm 土层大型土壤动物生物量显著高于其它两层(表 2),蒙古栎林和硬阔叶林 10—20 cm 土层大型土壤动物生物量大于凋落物层,红松人工林则正好相反,但均无显著差异(图 1)。

不同深度土层大型土壤动物的 H' 指数和 C 指数差异显著($P<0.01$), H' 指数随深度增加而减小, C 指数则正好相反(表 2)。 E 指数和 D 指数则无显著差异(表 2)。

3.4 大型土壤动物的时间分布规律

大型土壤动物类群数、个体密度及生物量均随时间变化显著($P<0.001$) (表 2)。总体看来,大型土壤动物密度和类群数均

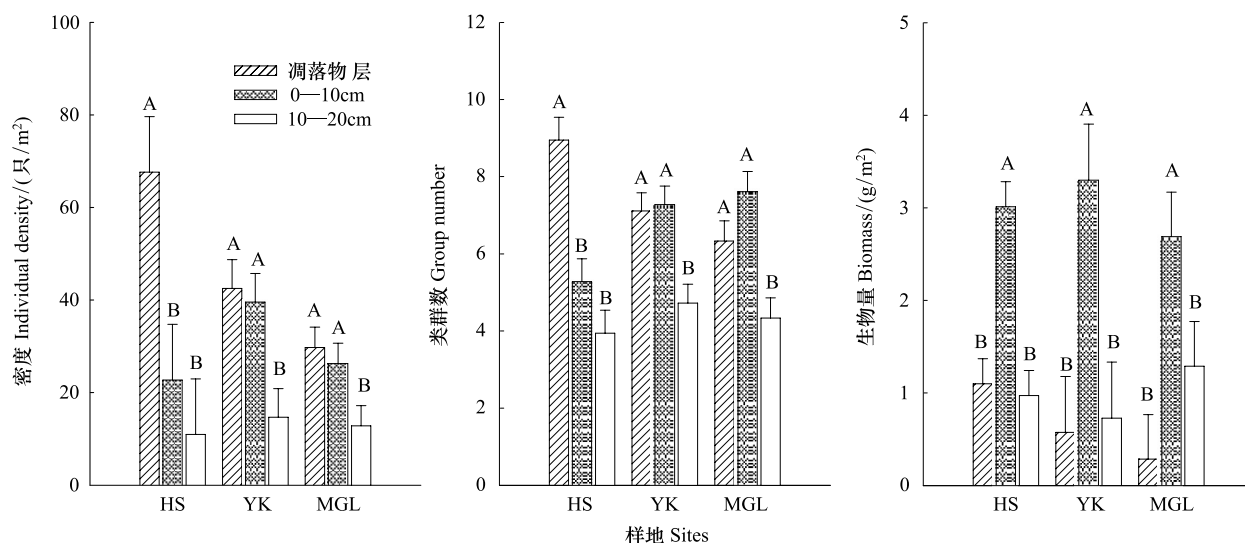


图1 不同样地大型土壤动物个体密度、类群数和生物量的垂直分布

Fig.1 The vertical distribution of individual density, group number and biomass of soil macro-fauna in different sites

HS:红松人工林 Korean pine plantation forest; YK:硬阔叶林 Hard-wood forest; MGL:蒙古栎林 Mongolian oak forest; TOC:土壤总有机碳 Total organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen; BD:容重 Bulk Density; A, B 表示差异显著 ($P < 0.05$)

以5月和10月较多(表2),但不同样地大型土壤动物个体密度和类群数时间变化规律存在差异,密度和类群数在红松人工林和硬阔叶林随时间变化显著,而其在蒙古栎林无显著差异(图2)。不同时间大型土壤动物的组成也不同,有些类群只出现在特定的月份,如蓟马科只出现在5月,剑蛭科仅在10月出现等。

3种群落大型土壤动物9月生物量显著高于其它各月(图2)。H'指数和C指数时间变化差异极显著($P < 0.01$),H'指数最大值出现在5月,C指数则6月高于其他各月。其他指数各月份间无显著差异(表2)。

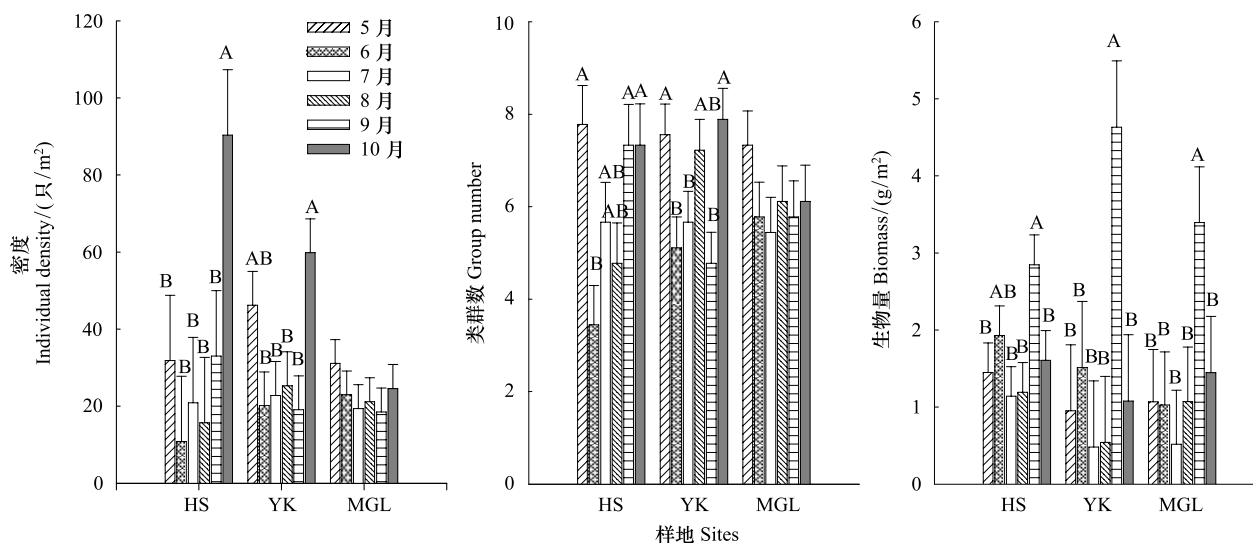


图2 大型土壤动物个体密度、类群数和生物量的时间动态

Fig.2 The dynamics of individual density, group number and biomass of soil macro-fauna in different sites

A, B 表示差异显著 ($P < 0.05$)

3.5 大型土壤动物群落指标与土壤环境因子的相关分析

双变量相关分析结果表明:大型土壤动物类群数呈现与总有机碳正相关,而与容重呈显著负相关关系且相关性极显著($P < 0.01$);个体密度与总有机碳和全氮均显著正相关;生物量则与总有机碳显著正相关;H'指数与容重极显著负相关,C指数则与容重极显著正相关($P < 0.01$)(表3)。

利用CCA分析大型土壤动物优势类群和常见类群的数量与土壤理化性质之间的关系(图3)。图中第一轴与第二轴的

Eigenvalues 值分别为 0.079 和 0.017。总体而言,石蜈蚣目、蜘蛛目和马陆目等分布广泛,主要集中于图的中心位置;红蜡科(Pyrrhocoridae)与全氮的相关性较大,腹足纲与总有机碳和全氮的相关性较大,而与容重相关性较大的为蛎科和隐翅甲科(图 3)。

表 3 大型土壤动物群落指标与土壤环境因子的相关性

Table 3 Correlation between soil macro-fauna community parameters and environment factors							
项目 Item	N	S	B	H'	E	C	D
TOC	0.987 *	0.918 **	0.816 *	0.792	-0.152	-0.684	-0.242
TN	0.904 *	0.779	0.641	0.619	-0.368	-0.476	-0.258
BD	-0.765	-0.955 **	-0.683	-0.984 **	-0.37	0.963 **	-0.286
pH	0.366	-0.072	0.208	-0.315	-0.752	0.411	-0.692

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关;** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

4 讨论

4.1 大型土壤动物群落组成特征

通过对帽儿山 3 种温带森林群落大型土壤动物的调查表明,正蚓科、线蚓科和石蜈蚣目为优势类群,表现出对环境普适性。许振文等^[23]在长白山地区的研究表明线蚓科为优势类群,而正蚓科为常见类群,与本研究结论不完全一致,说明不同地区温带森林土壤动物的类群组成存在差别。稀有类群对环境因子耐受较小,由于环境的异质性使其分布于不同的地区,因此 3 种森林群落以及不同土层深度均有各自的特有类群,这与以往学者^[14]对帽儿山土壤动物群落结构研究结果基本一致,即稀有类群虽然数量少,但是生态适应性弱,只有在一定条件下才能生存在个别群落中,因此能够反映环境的差异,对环境变化具有一定的指示作用^[24]。由此可见,对于土壤动物的研究应该更加注重稀有类群的分析,基于物种水平的土壤动物稀有类群与环境关系的研究,能更好的对环境变化及发展趋势进行评价和预测。

4.2 大型土壤动物空间分布特征

不同群落大型土壤动物类群数、个体密度及生物量差异不显著,主要是因为土壤动物优势类群和常见类群多具有较强的环境适应性(图 3),由此使温带森林生态系统大型土壤动物群落存在较大的稳定性,群落结构不随环境差异而显著变化。但微生境的变化也会引起土壤动物群落结构的细微差异,土壤环境因子是引起土壤动物个体密度和类群数变化的主要原因^[25]。蒙古栎林坡向为南坡,在温带地区南坡一般为阳坡,林冠郁闭度小,热量条件较好,坡度在 3 个样地中最大,土壤最干燥,不利于喜湿的土壤动物生存,因此正蚓科和线蚓科密度最小,同时这两种类群均为土壤动物群落的优势类群,从而导致蒙古栎林大型土壤动物总密度小于其它两个森林群落。红松人工林与硬阔叶林的立地条件相似,坡向均为北坡,硬阔叶林树种密度较红松林低,凋落物层比较薄,因此土壤动物个体密度略少于红松人工林。在大型土壤动物各类群中,正蚓科生物量最大,占总生物量 78.92%。生物量是能量研究中一个最基本的参数^[26],生物量较大的类群能迅速改良或破坏土壤的物理结构,影响土壤食物网,从而影响营养元素在生态系统中的周转率^[27],此结果表明正蚓科是帽儿山森林生态系统重要的分解者,在能量流动中具有重要作用,这与以往研究结果一致^[28]。

相关分析表明容重与 H' 指数显著负相关,与 C 指数显著正相关,蒙古栎林容重显著低于其它两个样地,尤其是 0—10 cm 土层(表 1),因此 3 个样地中蒙古栎林 C 指数最低,H' 指数最高。土壤动物多样性反映土壤中食物资源和生境的多样性、环境压力强度和土壤动物对环境的耐力,多样性指数比类群和密度更能体现群落的结构,在理论和实践中都具有重要意义。

凋落物及其形成的腐殖质是土壤动物重要食物来源,且具有一定保温和保湿作用,有利于土壤动物群落的数量增长^[29],随深度增加,土壤有机碳、全氮及养分下降(表 1),且通气透水性及温度随之降低^[29]。因此,在垂直方向上,大型土壤动物个体密度及类群数有明显表聚性特征,而蒙古栎林内干燥,凋落物不易分解,凋落物层湿度小,有机质含量低,0—10 cm 土层养分充足,根系发达,通气良好,所以在蒙古栎林大型土壤动物类群数以 0—10 cm 土层最丰富。土壤动物垂直分布特征说明,维持土壤表层的质量在保护土壤动物种群方面具有重要意义。

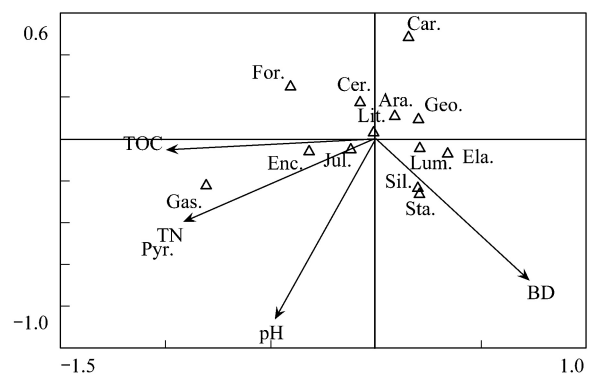


图 3 大型土壤动物典范对应分析二维排序图

Fig.3 Canonical correspondence analysis ordination based on soil macro-fauna

Lum.: 正蚓科 Lumbricidae; Enc.: 线蚓科 Enchytraeidae; Lit.: 石蜈蚣目 Lithobiomorpha; For.: 蚁科 Formicidae; Geo.: 地蜈蚣目 Geophilomorpha; Ara.: 蜘蛛目 Araneida; Jul.: 马陆目 Juliformia; Sta.: 隐翅甲科 Staphylinidae; Gas.: 腹足纲 Gastropoda; Cer.: 蜈蚣科 Ceratopogonidae; Ela.: 叩甲科 Elateridae; Car.: 步甲科 Carabidae; Pyr.: 红蜡科 Pyrrhocoridae; Sil.: 蛎科 Siliidae

4.3 大型土壤动物时间分布特征

温带地区环境条件(如光照、气温、降水、食物)的时间变化,既影响土壤动物的群落结构和多样性,又促使土壤动物形成适应机制。本研究结果显示大型土壤动物密度和类群数5月和10月较多,这与林英华^[14]的结论是相似的。帽儿山位于温带地区,生物有明显的年周期节律,5月气温回升、积雪融水使土壤的温度和水分增加,永久栖居的土壤动物复苏,暂时栖居的土壤动物以幼虫形式存在土壤中;10月凋落物层达到最厚,气温和水分条件适宜,大气中的部分昆虫进入土壤中冬眠。因此,这两段时间土壤动物的类群、密度和 H' 指数最大。7月和8月土壤动物密度并未达到最高可能是由于夏季降水集中,土壤水分处于饱和状态,造成一些土壤动物直接淹没死亡或因土壤空气缺氧窒息死亡等。而大型土壤动物生物量则为9月最高,此时经过生长季的积累,大型土壤动物接近成熟、个体较大,随后有些成虫完成繁殖后死亡,生物量减少。生物量的时间变化反映各月份土壤动物对环境作用强度的变化^[30-31]。蒙古栎林的个体密度和类群数各月差异不显著,说明其环境因子随时间变化较其余两个样地稳定。可见,大型土壤动物的类群数、密度、生物量及多样性指数动态变化是食物(凋落物数量和分解程度)和温湿综合作用的结果,土壤动物群落指标可指示森林生态系统对全球气候变化的响应。

4.4 大型土壤动物与土壤理化性质相关分析

双变量相关分析结果表明:大型土壤动物密度、类群数和生物量与总有机碳极显著正相关,密度与全氮显著正相关,这与刘继亮等^[11]对左家自然保护区大型土壤动物与环境因子的关系研究结果一致。因此,在土壤环境各因子中,土壤有机质和全氮对大型土壤动物的分布影响较大。CCA结果表明,不同类群土壤动物与土壤理化环境的相关性不同:红蟠科与全氮显著相关,腹足纲与总有机碳和全氮显著正相关,而蛎科和隐翅甲科与土壤容重显著正相关。不同类群的土壤动物具有选择性吸收和富集某些元素的功能^[32],因此研究土壤动物分布与生态环境的关系,对促进土壤动物的有益发展和抑制其有害活动,维持土壤生态系统平衡,具有重要意义。

5 结论

通过对帽儿山3种森林群落大型土壤动物连续动态研究发现,土壤动物的群落结构和多样性受植被、立地条件和土壤理化性质的影响。不同样地间大型土壤动物群落结构指标差异不显著,说明多数类群具有较大的环境适应性;土壤动物密度、类群数和多样性指数垂直分布基本表现出表聚性,即从凋落物层向下显著减小;时间变化表现为5月和10月个体密度较大,类群较丰富,9月生物量最大。由此可见,土壤微环境要素的特征及其时间和空间的动态变化规律直接决定了土壤动物的生活环境,大型土壤动物的群落结构及多样性等具有较大的时空异质性。

致谢:帽儿山森林生态定位站在实验过程中给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Sun R Y. Principles of animal ecology. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001.
- [2] Edwards C A. Assessing the effects of environmental pollutants on soil organisms, communities, processes and ecosystems. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38(3/4): 225-231.
- [3] Freckman D W, Ettema C H. Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1993, 45(3/4): 239-261.
- [4] Fu S L, Ferris H, Brown D, Plant R. Does the positive feedback effect of nematodes on the biomass and activity of their bacteria prey vary with nematode species and population size? *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 1979-1987.
- [5] Wang S J, Ruan H H. Feedback mechanisms of soil biota to aboveground biology in terrestrial ecosystems. *Biodiversity Science*, 2008, 16(4): 407-416.
- [6] Li T, Liu W Q, Guo S M, Ke G Q, Zhang Z, Xiao X B, Liu W. Community traits of soil fauna in forestlands converted from cultivated lands in limestone red soil region of Ruichang, Jiangxi Province of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 910-916.
- [7] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, Classen A T. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 37-44.
- [8] Yin W Y. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998.
- [9] 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.
- [10] Wolters V. Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(4): 221-227.
- [11] Liu J L, Yin X Q, Qiu L L. Large-sized soil fauna and soil factors in Zuojia Nature Reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 130-136.
- [12] Jiao X L, Zhu J J, Yan Q L. Composition and seasonal dynamics of macro- and meso- soil fauna in secondary forest ecosystems of Liaodong montane area, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2631-2638.
- [13] Pang X Y, Liu Q, Liu S Q, Wu Y, Lin B, He H. Effect of human-induced disturbance on soil physical properties of subalpine coniferous forests in western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(6): 583-587.
- [14] Lin Y H, Sun J B, Liu H L, Zhang F D, Sun L, Jin S. Composition of soil fauna community and its diversity analysis at Maoershan Mountains of

- Heilongjiang Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(4): 71-77.
- [15] Liu J L, Cao J, Li S J, Pan C L, Pan C C. Characteristics of soil macrofaunal community structure in secondary forest and forest plantations in western Qinling Mountains of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2459-2466.
- [16] Zhang X P, Huang C L, Li J K. Efficiencies of earthworms (*Eisenia foetida*) decomposing forest litters. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2427-2433.
- [17] Zhong W Y, Yin X Q, Chen P. Relationship of litter decomposition and consumption with soil animals in Maoer Mountain forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4): 511-512.
- [18] Guo Q X, Zhang H Y, Wang X C, Wang C K. Simulation of soil respiration for typical forests in Northeast China: Localized application of IBIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2295-2303.
- [19] Yang J Y, Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1640-1647.
- [20] Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [21] Liu S, Wang C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [22] Zhang X P, Huang L R, Jiang L Q. Characteristics of macro-soil fauna in forest ecosystem of northern Da Hinggan Mountains. *Geographical Research*, 2008, 27(3): 509-518.
- [23] Xu Z W, Liu G, Zuo W. Soil fauna in Tumenling of Changbaishan Mountain. *Soil*, 2003, (2): 152-159.
- [24] Yin X Q, Wu D H, Han X M. Diversity of soil animals community in Xiao Hinggan Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3): 316-322.
- [25] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y. Effects of different afforestation types on soil faunal diversity in Horqin Sand Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 1104-1110.
- [26] Yan D K, Wang S L, Hu Y L, Gao H, Zhang X Y. A comparative study on soil fauna in native secondary evergreen broad-leaved forest and Chinese fir plantation forests in subtropics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1792-1796.
- [27] Yin X Q, Liu J L, Gao M. Relationships of nutrient elements in forest ecosystem of Xiao Hinggan Mountains and role of soil fauna. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6): 814-819.
- [28] Zhang X P, Hou W L, Chen P. Soil animal guilds and their ecological distribution in the northeast of China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(4): 370-374.
- [29] Cui L W, Liu S R, Liu X L, Wu P F, Zhang H Z, He X J. Changes of soil faunal communities during the restoration progress of *Abies faxoniana* Forests in Northwestern Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4772-4783.
- [30] Guan H B, Guo L, Liu Y J. The vertical distribution, seasonal dynamics and community variety of soil animal in Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(1): 110-114.
- [31] Liu Y J, Liu X M, Guo L, A L T Q Q G. The study on soil animal ecology in Inner Mongolia grassland. *Grassland of China*, 1999, (3): 51-56.
- [32] Chen P, Fu D Y. A preliminary approach to the effect of soil animals on the cycling of materials in the Changbai Shan Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(2): 172-180.

参考文献:

- [1] 孙儒泳. 动物生态学原理. 北京: 北京师范大学出版社, 2001.
- [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.
- [6] 李涛, 刘苑秋, 郭圣茂, 柯国庆, 张钊, 肖绪宝, 刘武. 瑞昌石灰岩红壤区退耕还林土壤动物群落特征. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 910-916.
- [8] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 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.
- [11] 刘继亮, 殷秀琴, 邱丽丽. 左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究. *土壤学报*, 2008, 45(1): 130-136.
- [12] 焦向丽, 朱教君, 闫巧玲. 辽东山区次生林生态系统大、中型土壤动物组成与季节动态. *生态学报*, 2009, 29(5): 2631-2638.
- [13] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海. 人为干扰对川西亚高山针叶林土壤物理性质的影响. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(6): 583-587.
- [14] 林英华, 孙家宝, 刘海良, 张夫道, 孙龙, 金森. 黑龙江帽儿山土壤动物群落组成与多样性分析. *林业科学*, 2006, 42(4): 71-77.
- [15] 刘继亮, 曹靖, 李世杰, 潘春林, 潘成臣. 秦岭西部山地次生林和人工林大型土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2459-2466.
- [16] 张雪萍, 黄初龙, 李景科. 赤子爱胜蚓对森林凋落物的分解效率. *生态学报*, 2005, 25(9): 2427-2433.

- [17] 仲伟彦, 殷秀琴, 陈鹏. 帽儿山森林落叶分解消耗与土壤动物关系的研究. 应用生态学报, 1999, 10(4): 511-512.
- [18] 国庆喜, 张海燕, 王兴昌, 王传宽. 东北典型森林土壤呼吸的模拟-IBIS 模型的局域化应用. 生态学报, 2010, 30(9): 2295-2303.
- [19] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. 生态学报, 2006, 26(6): 1640-1647.
- [20] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. 生态学报, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [21] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局. 生态学报, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [22] 张雪萍, 黄丽荣, 姜丽秋. 大兴安岭北部森林生态系统大型土壤动物群落特征. 地理研究, 2008, 27(3): 509-518.
- [23] 许振文, 刘刚, 左伟. 长白山余脉土们岭土壤动物调查与分析. 土壤, 2003, (2): 156-159.
- [24] 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.
- [25] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 科尔沁沙地不同造林类型对土壤动物多样性的影响. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1104-1110.
- [26] 颜绍榘, 汪思龙, 胡亚林, 高洪, 张秀永. 亚热带天然次生常绿阔叶林与杉木人工林土壤动物群落特征比较. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1792-1796.
- [27] 殷秀琴, 刘继亮, 高明. 小兴安岭森林生态系统中营养元素关系及土壤动物的作用. 地理科学, 2007, 27(6): 814-819.
- [28] 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.
- [29] 崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 吴鹏飞, 张洪芝, 何先进. 川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态. 生态学报, 2012, 32(15): 4772-4783.
- [30] 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(1): 110-114.
- [31] 刘永江, 刘新民, 郭砺, 阿拉坦其其格. 内蒙古草原带土壤动物生态学研究. 中国草地, 1999, (3): 51-56.
- [32] 陈鹏, 富德义. 长白山土壤动物在物质循环中作用的初步探讨. 生态学报, 1984, 4(2): 172-180.

附表 1 不同森林群落大型土壤动物类群和数量组成

Appendix table 1 Group composition and quantitative distribution of soil macro-fauna in different forest communities (Mean±SE)

类群 Taxon	HS		YK		MGL		合计 Total	
	密度 Density /(只/m ²)	%	密度 Density /(只/m ²)	%	密度 Density /(只/m ²)	%	密度 Density /(只/m ²)	%
正蚓科 Lumbricidae	14.05±3.21	41.59	7.06±3.21	21.9	4.84±3.21	21.11	8.65±1.85	29.16
线蚓科 Enchytraeidae	3.19±1.211	9.43	8.62±1.21	26.72	2.79±1.21	12.17	4.86±0.700	16.4
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	3.68±1.21	10.89	2.57±0.63	7.96	2.74±0.63	11.95	3.00±0.36	10.1
蚁科 Formicidae	1.01±1.24	3	3.98±1.24	12.33	2.84±1.24	12.38	2.61±0.72	8.8
地蜈蚣目 Geophilomorpha	2.44±0.38	7.24	2.03±0.38	6.28	2.17±0.38	9.48	2.21±0.22	7.46
蜘蛛目 Araneida	1.36±0.49	4.02	2.00±0.49	6.2	2.82±0.49	12.28	2.06±0.29	6.94
马陆目 Juliformia	0.94±0.24	2.78	1.28±0.24	3.98	0.84±0.24	3.66	1.02±0.14	3.44
隐翅甲科 Staphylinidae	0.96±0.17	2.85	0.57±0.17	1.76	0.47±0.17	2.01	0.67±0.10	2.25
步甲科 Carabidae	0.91±0.15	2.71	0.37±0.15	1.15	0.47±0.15	2.05	0.58±0.09	1.97
腹足纲 Gastropoda	0.40±0.29	1.17	1.21±0.29	3.75	0.10±0.29	0.43	0.57±0.17	1.92
螺科 Ceratopogonidae	0.77±0.47	2.26	0.74±0.47	2.3	0.17±0.47	0.75	0.56±0.27	1.89
叩甲科 Elateridae	0.72±0.13	2.12	0.42±0.13	1.3	0.40±0.13	1.72	0.51±0.08	1.72
红蝽科 Pyrrhocoridae	0.79±0.21	2.34	0.25±0.21	0.77	0.22±0.21	0.97	0.42±0.12	1.42
蚱科 Siliidae	0.86±0.47	2.56	0.07±0.47	0.23	0.03±0.47	0.11	0.32±0.27	1.08
金龟甲科 Scarabaeidae	0.50±0.13	0.73	0.07±0.13	0.23	0.54±0.13	2.37	0.29±0.08	0.97
象甲科 Curculionidae	0.10±0.07	0.29	0.15±0.07	0.46	0.22±0.07	0.97	0.16±0.04	0.53
夜蛾科 Noctuidae	0.15±0.06	0.44	0.12±0.06	0.38	0.12±0.06	0.54	0.13±0.04	0.45
虻科 Tabanidae	0.20±0.07	0.59	0.05±0.07	0.15	0.03±0.07	0.11	0.09±0.04	0.31
毛蠓科 Psychodidae	0	0	0	0	0.22±0.12	0.97	0.07±0.07	0.25
拟蝎目 Pseudoscorpionida	0.05±0.05	0.15	0.10±0.05	0.31	0.07±0.05	0.32	0.07±0.03	0.25
拟步甲科 Tenebrionidae	0.12±0.06	0.36	0.07±0.06	0.23	0	0	0.07±0.03	0.22
叶甲科 Chrysomelidae	0.17±0.05	0.51	0	0	0.03±0.05	0.11	0.07±0.03	0.22
葬甲科 Silphidae	0.05±0.04	0.15	0.05±0.04	0.15	0.05±0.04	0.21	0.05±0.02	0.17
盲蝽科 Miridae	0.10±0.06	0.29	0	0	0	0	0.03±0.03	0.11
尺蛾科 Geometridae	0.07±0.04	0.22	0	0	0	0	0.03±0.02	0.11
叶蝉科 Cicadellidae	0.03±0.04	0.07	0	0	0.07±0.04	0.32	0.03±0.02	0.11
蕈蚊科 Mycetophilidae	0	0	0.03±0.03	0.08	0.07±0.03	0.32	0.03±0.02	0.11
瓢虫科 Coccinellidae	0.07±0.03	0.22	0	0	0	0	0.03±0.02	0.08
萤科 Lampyridae	0	0	0.03±0.03	0.08	0.05±0.03	0.21	0.03±0.02	0.08

续表

类群 Taxon	HS		YK		MGL		合计 Total	
	密度 Density /(只/m ²)	%	密度 Density /(只/m ²)	%	密度 Density /(只/m ²)	%	密度 Density /(只/m ²)	%
大蚊科 Tipulidae	0	0	0	0	0.07±0.02	0.32	0.03±0.01	0.08
毒蛾科 Lymantriidae	0.07±0.02	0.22	0	0	0	0	0.03±0.01	0.08
郭公甲科 Cleridae	0.05±0.03	0.15	0	0	0.03±0.03	0.11	0.03±0.01	0.08
猎蝽科 Reduviidae	0	0	0.07±0.02	0.23	0	0	0.03±0.01	0.08
啮目 Psocoptera	0.03±0.03	0.07	0	0	0.05±0.03	0.21	0.03±0.01	0.08
食虫虻科 Asilidae	0.03±0.03	0.07	0.05±0.03	0.15	0	0	0.03±0.01	0.08
蚊科 Culicidae	0	0	0.07±0.02	0.23	0	0	0.03±0.01	0.08
长足虻科 Dolichopodidae	0.03±0.03	0.07	0.03±0.03	0.08	0.03±0.03	0.11	0.03±0.014	0.08
花萤科 Cantharidae	0	0	0.0±0.03	0	0.05±0.03	0.21	0.02±0.01	0.05
蝽科 Pentatomidae	0.03±0.02	0.07	0.03±0.02	0.08	0	0	0.02±0.01	0.05
大蕈甲科 Erotylidae	0	0	0.03±0.02	0.08	0.03±0.02	0.11	0.02±0.01	0.05
革翅目 Dermaptera	0	0	0	0	0.05±0.02	0.21	0.02±0.01	0.05
胡蜂科 Vespidae	0.03±0.02	0.07	0.03±0.02	0.08	0	0	0.02±0.01	0.05
盲蛛目 Phalangida	0	0	0	0	0.05±0.02	0.21	0.02±0.01	0.05
水龟甲科 Hydrophilidae	0.05±0.02	0.15	0	0	0	0	0.02±0.01	0.05
阎甲科 Histeridae	0	0	0	0	0.05±0.02	0.21	0.02±0.01	0.05
扁甲科 Cucujidae	0.03±0.01	0.07	0	0	0	0	0.01±0.01	0.03
虎甲科 Cicindelidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
姬蜂科 Ichneumonidae	0	0	0.03±0.01	0.08	0	0	0.01±0.01	0.03
蓟马科 Thripidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
剑虻科 Therevidae	0	0	0.03±0.01	0.08	0	0	0.01±0.01	0.03
螟蛾科 Pyralidae	0.03±0.01	0.07	0	0	0	0	0.01±0.01	0.03
木蠹蛾科 Cossidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
木虱科 Psyllidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
天牛科 Cerambycidae	0	0	0.03±0.01	0.08	0	0	0.01±0.01	0.03
舞虻科 Empididae	0	0	0.03±0.01	0.08	0	0	0.01±0.01	0.03
小蕈甲科 Mycetophagidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
蝇科 Muscidae	0	0	0.03±0.01	0.08	0	0	0.01±0.01	0.03
鹬虻科 Rhagionidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
沼大蚊科 Limoniidae	0	0	0	0	0.03±0.01	0.11	0.01±0.01	0.03
总密度 Total density	33.78±4.73		33.25±4.73		22.96±4.73		29.66±2.73	

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.19 Oct., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

A review of ecosystem services and research perspectives	MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)
Sexual interference in non-human primates	YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)
Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review	HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)
Proximate and ultimate determinants of food chain length	WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)
Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi	 LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)
Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen	 XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006)
Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve	 ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)
Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant (<i>Syrnaticus reevesii</i>) using infrared camera	 ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration	 YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve	 LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China	 LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)
The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i>	 WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i>	 CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> under cadmium stress	 WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)
Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings	 YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)
The morphological and physiological responses of <i>Tamarix ramosissima</i> seedling to different irrigation methods in the extremely arid area	 MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)
Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells	 WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)
Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants	 TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)
Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of <i>Casuarina equisetifolia</i> plantations at different ages	 YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)
Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta	 PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of <i>Bauhinia faberi</i> seedlings	 SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)
Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate nitrogen and salinity	 ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)
Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO ₂	 SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i>	 MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i>	 ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)
Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation	 LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)
Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass <i>Halophila beccarii</i> in Pearl Bay, Guangxi	 QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)
Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China	 YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)
Life history characteristics and spatial distribution of <i>Populus pruinosa</i> population at the upper reaches of Tarim River	 HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)
Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau	 ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元