

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

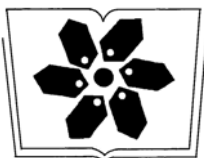
## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第3期 Vol.34 No.3 **2014**

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 34 卷 第 3 期 2014 年 2 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 灾后生态恢复评价研究进展 ..... 刘孝富,王文杰,李京,等 (527)
- 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析 ..... 庞明月,张力小,王长波 (537)

### 个体与基础生态

- 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力 ..... 马璐,曹文清,张文静,等 (546)
- 鲢鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力 ..... 樊晓丽,林植华,丁先龙,等 (555)
- 环境温度对白头鹇代谢产热和蒸发失水的影响 ..... 林琳,曹梦婷,胡益林,等 (564)
- 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响 ..... 黄彩变,曾凡江,雷加强,等 (572)
- PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响 ..... 朱凡,洪湘琦,闫文德,等 (581)
- 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价 ..... 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇 (589)
- 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测 ..... 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等 (597)

### 种群、群落和生态系统

- 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性 ..... 高福元,赵成章,卓马兰草 (605)
- 捕食者对空心莲子草叶甲种群的生物胁迫 ..... 刘雨芳,李菲,桂芳艳,等 (613)
- 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 ..... 马威,孙军 (621)
- 磨盘山天然次生林凋落物数量及动态 ..... 范春楠,郭忠玲,郑金萍,等 (633)
- 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响 ..... 刘方春,邢尚军,马海林,等 (642)
- 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例 ..... 张雷,王琳琳,张旭东,等 (650)
- 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究 ..... 侯鹏,申文明,王桥,等 (660)
- 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子 ..... 黄辉,孟平,张劲松,等 (667)
- 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量特征 ..... 贺桂香,李凯辉,宋韦,等 (674)

### 景观、区域和全球生态

- 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 ..... 马明德,马学娟,谢应忠,等 (682)
- 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率 ..... 董林林,杨浩,于东升,等 (690)
- 自养微生物同化  $\text{CO}_2$  的分子生态研究及同化碳在土壤中的转化 ..... 吴小红,简燕,陈晓娟,等 (701)

### 资源与产业生态

- 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 ..... 孙玉峰,郭全营 (710)

基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估——以舟山海岸带为例 ..... 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等 (718)

城乡与社会生态

基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 ..... 李春林,刘 淼,胡远满,等 (727)

研究简报

陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异 ..... 梁 婷,同延安,林 文,等 (738)

不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响 ..... 刘小勇,李红旭,李建明,等 (746)

长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性..... 王振海,殷秀琴,蒋云峰 (755)

最大可允许填海面积模拟——厦门西海域案例研究 ..... 林琛琛,饶欢欢,刘 岩,等 (766)

学术信息与动态

2013 年水文土壤学与自然资源可持续利用国际学术研讨会述评 ..... 张 骁,赵文武 (774)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 252 \* zh \* P \* ￥90.00 \* 1510 \* 29 \* 2014-02



封面图说：云南松树冠——云南松为松科松属裸子植物，多生长在海拔 1000—3500m 的高山，喜光、耐干旱、耐瘠薄，适应酸性的红壤、黄壤，在其他树种不能生长的贫瘠石砾地或冲刷严重的荒山坡分布，易于天然更新。主要分布于四川西南部、云南、西藏东南部、贵州西部、广西西部，常形成大面积纯林，尤以云南分布最广，故有云南松之称。云南松树高可达 30m，胸径达 1m，树皮呈灰褐色，叶通常 3 针一束，鲜有两针，球果圆锥状卵圆形，种子近卵圆形或倒卵形。树干通直，木质轻软细密，是优质造纸、人造板原料，富含松脂是云南松的重要特点之一。

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/stxb201306081438

王振海, 殷秀琴, 蒋云峰. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性. 生态学报, 2014, 34(3): 755-765.

Wang Z H, Yin X Q, Jiang Y F. Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 755-765.

# 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性

王振海<sup>1</sup>, 殷秀琴<sup>1,2,\*</sup>, 蒋云峰<sup>1</sup>

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 吉林省动物资源保护与利用重点实验室, 长春 130024)

**摘要:** 长白山苔原生态对环境变化非常敏感, 一旦破坏很难恢复。土壤动物是陆地生态系统的重要组成部分, 联系着地上和地下生态系统。为探讨长白山苔原带土壤动物群落的组成、结构和多样性特征, 于 2009 年 5 月、7 月和 9 月对上部和下部苔原带土壤动物进行了研究。研究表明: 长白山整个苔原带土壤动物优势类群为甲螨亚目、节跳虫科和球角跳虫科。下部苔原带土壤动物个体数和类群数多, 群落结构较为复杂。土壤动物的个体数随生境和时间变化有很大波动, 类群数变化则较小。在 7 月份个体数最少, 而类群数随着时间的变化有减少的趋势。土壤动物的垂直分布随时间和生境的不同而异。上部苔原亚带 9 月的甲螨亚目 ( $P < 0.01$ )、革螨亚目 ( $P < 0.05$ ) 及下部苔原亚带 5 月的甲螨亚目、革螨亚目、辐螨亚目 ( $P = 0.03$ ,  $P = 0.011$ ,  $P = 0.027$ ) 0—5 cm 土层显著高于凋落物层; 下部苔原亚带 5 月的球角跳虫科 ( $P = 0.001$ ) 及各月的节跳虫科和山跳虫科在各层之间存在显著差异 ( $P = 0.001$ ,  $P = 0.036$ ,  $P = 0.005$ ,  $P = 0.001$ ,  $P = 0.04$ ,  $P = 0.009$ )。两个亚带土壤动物多样性随时间的变化都有递减的趋势。土壤动物的多样性指数、丰富度指数和均匀度指数均是下部苔原亚带高于上部苔原亚带, 而优势度指数则相反。相似性指数表明两个亚带土壤动物群落组成上存在一定的差异, 各类群的相对数量差异在 9 月最大。下部苔原亚带的生境条件较适宜土壤动物生存, 生物多样性较高。

**关键词:** 土壤动物; 群落结构; 多样性; 苔原带; 长白山

## Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China

WANG Zhenhai<sup>1</sup>, YIN Xiuqin<sup>1,2,\*</sup>, JIANG Yunfeng<sup>1</sup>

1 School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

2 Jilin Key Laboratory of Animal Resource Conservation and Utilization, Changchun 130024, China

**Abstract:** The ecosystem of the Changbai Mountains is the sensitive natural succession or to environmental change after volcanic eruption. Once the ecosystem of the Changbai Mountains, which has a thin soil layer, is damaged, it is difficult to restore. Soil fauna, an important component in terrestrial ecosystems, is closely connected with the above and under ground ecosystems and plays an important role in terms of material circulation and energy flow. In addition, soil fauna has a certain response to the changes in environmental factors, such as vegetation and soil. An investigation was carried out in both the upper and lower tundra of the Changbai Mountains, during May, July, September 2009, to study the characteristics of composition, structure and diversity of soil fauna. This can provide a scientific basis for the conservation and sustainable development of the Changbai Mountains ecosystem.

On each sampling visit, soil macrofauna and meso-microfauna were collected in both the upper and lower tundra using a sampling quadrat of sizes 25 cm×25 cm and 10 cm×10 cm, respectively. Six repeat sampling quadrats were set up in both the upper and lower tundra and litter layer at depths 0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm in each quadrat. Soil macrofauna

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41171207, 40871120)

收稿日期: 2013-06-08; 修订日期: 2013-11-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinxq773@nenu.edu.cn

were picked by hand-sorting methods in sample plots, while the soil meso-microfauna were collected by modified Tullgren.

The results showed that the dominant groups were Oribatida, Isotomidae and Hypogastruridae. The soil fauna community structure in the lower tundra, which possessed higher individual and group numbers, was more complicated. The individual number was influenced by the habitat characteristics of the research zones and fluctuated with the seasons, while the group number did not change significantly. In both of the subzones, the individual numbers of soil fauna were lower in July, while the group numbers had a tendency to decrease. Both the habitat and season had a significant effect on the vertical distribution of different soil fauna. In the upper tundra, the individual number of Oribatida ( $P < 0.01$ ) and Gamasida ( $P < 0.05$ ) in September in the 0—5 cm soil layer were higher than those in the other layers. In May, Oribatida, Gamasida and Actinedida ( $P=0.03$ ,  $P=0.011$ ,  $P=0.027$ ) in the lower tundra had the same distribution pattern. Distinct differences existed in the vertical distribution of Hypogastruridae ( $P=0.001$ ) in May and Isotomidae and Pseudochorutidae in May, July and September in the lower tundra ( $P=0.001$ ,  $P=0.036$ ,  $P=0.005$ ,  $P=0.001$ ,  $P=0.04$ ,  $P=0.009$ ). The diversities of soil fauna of both subzones had a decreasing tendency with time changes. The diversity index, Margalef index and Pielou index of soil fauna in the upper tundra were lower than those in the lower tundra, while the Simpson index in the upper tundra was higher. Comparison of the similarity index showed that the soil fauna community composition was different between both subzones. The quantity variance in different soil fauna was greatest in September. All the results detailed above showed that the lower tundra with the better habitat conditions is more suitable for soil fauna survival, so that there is a higher biodiversity than that of the upper tundra.

**Key Words:** soil fauna; community structure; diversity; tundra; Changbai Mountains

土壤动物是陆地生态系统的重要组成部分,联系着地上和地下生态系统<sup>[1-2]</sup>,在物质循环和能量流动等方面起着重要的作用<sup>[3-4]</sup>,对植被、土壤等环境因子的变化有一定的响应<sup>[5-6]</sup>。近年来,土壤动物的生态学研究越来越受到学者们的关注<sup>[7-9]</sup>。

长白山属于温带大陆性季风气候,是欧亚大陆北半部最具代表性的典型综合自然体和物种基因库,是我国重要的地理单元。然而,现在的长白山生态系统是火山喷发后自然演替而成,土壤层较薄,生态环境比较脆弱。近年来学者们加强了对长白山生态系统的研究,在火山遥感监测、植被与环境的关系等方面都进行了比较全面的研究;土壤动物方面,张荣祖、陈鹏等最早对长白山土壤动物进行了调查研究<sup>[10-11]</sup>,殷秀琴等对长白山红松阔叶混交林土壤动物生态分布进行了研究<sup>[12]</sup>,佟富春等对长白山土壤动物群落随海拔的变化进行研究<sup>[13-14]</sup>。长白山苔原带植被以小灌木和苔藓、地衣为主,生态环境更为脆弱,对于土壤动物的研究较少,仅陈鹏等在 1983 年进行了研究<sup>[15-16]</sup>。本文通过对上部和下部苔原带土壤动物的研究,旨在较深入的探讨长白山苔原带土壤动物群落的组成、结构和多样性特征,为长白山生

态系统的保护和可持续发展提供科学依据。因此具有重要的生态学意义。

## 1 研究区概况

长白山苔原带位于海拔 2000 m 以上,属于火山锥体的上部,寒冷而风大。每年至少有 6 个月的时间被积雪覆盖。根据植被情况将苔原带分上下两个亚带。

上部苔原亚带位于海拔 2300 m 以上,主要特征为寒冷多雾、降水多以及风大。1 月平均气温低于 $-20^{\circ}\text{C}$ ,7 月为 $8-10^{\circ}\text{C}$ ,无霜期不足 60 d。土壤为高山寒漠土<sup>[16]</sup>,植被总覆盖度为 40%<sup>[17]</sup>,以苔藓地衣为主,伴有珠芽拳蓼(*Bistorta vivipara*)、萝藦草(*Lloydia serotina*)和轮叶马先蒿(*Pedicularis verticillat*)等。

下部苔原亚带位于 2000—2300 m,寒冷而风大, $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温为 300—500 $^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 1100—1300 mm,土壤为高山苔原土<sup>[16]</sup>,植被总覆盖度为 100%<sup>[17]</sup>,主要植物有仙女木(*Dryas octopetala*)、牛皮杜鹃(*Rhododendron aureum*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、毛毡杜鹃(*Rhododendron confertifissimum*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤动物的采集与鉴定

2009 年 5 月、7 月、9 月在长白山苔原带上、下两个亚带分别设置样地进行取样。大型土壤动物按 25 cm×25 cm 的样方进行取样,中小型土壤动物按 10 cm×10 cm 样方取样,分别设 6 个重复样方;每个样方分别取凋落物层、0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm 土层;共取 288 个样品。大型土壤动物采用手拣法就地获取,中小型土壤动物带回室内采用 Tullgren 分离。收集到所有的土壤动物放到 75% 的酒精中保存。

土壤动物在体视镜(OLYMPUS SZX16)下的鉴定,一般鉴定到科,少数鉴定到目水平。

### 2.2 数据处理

土壤动物群落多度等级的划分:个体数占总捕获量 10% 以上的为优势类群,个体数占总捕获量 1%—10% 之间的为常见类群,个体数占总捕获量的 1% 以下的为稀有类群。

土壤动物多样性特征主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数  $H'$ 、Margalef 丰富度指数  $D$ 、Pielou 均匀度指数  $J$  和 Simpson 优势度指数  $C$  来计算。

Shannon-Wiener 多样性指数  $H'$

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

Margalef 丰富度指数  $D$

$$D = \frac{s-1}{\ln N} \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数  $J$

$$J = \frac{H'}{\ln s} \quad (3)$$

Simpson 优势度指数  $C$

$$C = \sum_{i=1}^s (n_i/N)^2 \quad (4)$$

式中, $s$  代表土壤动物的总类群数, $P_i$  代表第  $i$  类土壤动物的个体数与土壤动物总个体数的比, $n_i$  为第  $i$  类群个体数, $N$  为群落的总个体数。

土壤动物群落的相似性采用 Sorenson 相似性系数  $S_1$ (定性分析群落相似性,考虑物种组成的差异性)和 Morisita-Horn 相似性系数  $S_2$ (定量分析群落相似性,考虑到每个物种的丰度)来表示。

Sorenson 相似性系数  $S_1$ :

$$S_1 = 2c(a+b) \quad (5)$$

式中, $a$  为 A 生境全部类群数, $b$  为 B 生境全部类群数, $c$  为 A、B 两生境共有的类群数。计算值在 0.75—1.00 之间为极相似,在 0.50—0.74 之间为中等相似,在 0.25—0.49 之间为中等不相似,在 0—0.24 之间为极不相似。

Morisita-Horn 相似性系数  $S_2$

$$S_2 = \frac{2(aN)(bN) \sum_{i=1}^s (a n_i)(b n_i)}{b N^2 \sum_{i=1}^s a n_i^2 + a N^2 \sum_{i=1}^s b n_i^2} \quad (6)$$

式中, $s$  为 A、B 两生境所有的类群数; $aN$  和  $bN$  分别为 A、B 生境中所有类群的总个体数; $a n_i$  和  $b n_i$  分别 A、B 生境中第  $i$  个类群的个体数。

采用 EXCEL2003 进行图表绘制和计算土壤动物多样性指数,用 SPSS18.0 进行方差分析和均值比较。

## 3 研究结果

### 3.1 土壤动物群落组成特征

共获得土壤动物 10286 只,计 37 类(表 1),隶属 2 门 6 纲 16 目 26 科。优势类群为甲螨亚目、节跳虫科和球角跳虫科 3 类,占苔原带总捕获量的 69.86%,常见类群为革螨亚目、辐螨亚目、山跳虫科和线蚓科 4 类,占总数的 27.57%,其余 30 类为稀有类群,占 2.57%。

上部苔原亚带捕获 4535 只,占 44.09%,24 类;优势类群为节跳虫科,占上部苔原带总数的 57.55%,常见类群为甲螨亚目、革螨亚目、辐螨亚目、山跳虫科、球角跳虫科和线蚓科 6 类,占 39.43%,其余 17 类为稀有类群,占 3.02%。下部苔原亚带共捕获土壤动物 32 类,5751 只,占土壤动物总数的 55.91%。优势类群为甲螨亚目、辐螨亚目、节跳虫科和球角跳虫科 4 类,占该带的 77.12%,常见类群为革螨亚目、山跳虫科和线蚓科 3 类,占 20.67%,其余 25 类为稀有类群,占 2.21%。说明下部苔原亚带生境更适宜土壤动物生存,土壤动物群落组成较复杂。

两个亚带土壤动物的优势类群和常见类群存在一定差异,并且上部苔原亚带不同类群所占比例差异较大,仅节跳虫科占上部苔原亚带的一半以上,远大于其在下部苔原亚带所占的比例;两个亚带的稀

有类群在组成上存在一定的差异,鳞跳虫科、花萤科幼虫、地么蚣科、啮虫科、夜蛾科幼虫、地蜈蚣科、象甲科、叩甲科幼虫、萤科幼虫、拟态蛛科、叶甲科幼

虫、马陆目、么蚣科土壤动物仅出现在下部苔原亚带,这对该生境有一定的指示作用。

表 1 研究区土壤动物群落组成  
Table 1 Compositions of soil fauna community in two sites

|                             | 上部苔原亚带<br>The upper tundra | %     | 下部苔原亚带<br>The lower tundra | %     | 合计<br>Total | %     |
|-----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------|-------|
| 节跳虫科 Isotomidae             | 2610                       | 57.55 | 2075                       | 36.08 | 4685        | 45.55 |
| 甲螨亚目 Oribatida              | 431                        | 9.5   | 1038                       | 18.05 | 1469        | 14.28 |
| 球角跳虫科 Hypogastruridae       | 300                        | 6.62  | 732                        | 12.73 | 1032        | 10.03 |
| 辐螨亚目 Actinedida             | 396                        | 8.73  | 590                        | 10.26 | 986         | 9.59  |
| 山跳虫科 Pseudoscorpionidae     | 382                        | 8.42  | 522                        | 9.08  | 904         | 8.79  |
| 线蚓科 Enchytraeidae           | 184                        | 4.08  | 491                        | 8.54  | 675         | 6.56  |
| 革螨亚目 Gamasida               | 95                         | 2.09  | 176                        | 3.06  | 271         | 2.63  |
| 短角亚目幼虫 Brachycera larvae    | 12                         | 0.26  | 28                         | 0.49  | 40          | 0.39  |
| 芒角亚目幼虫 Aristocera larvae    | 23                         | 0.51  | 16                         | 0.28  | 39          | 0.38  |
| 长角亚目幼虫 Nematocera larvae    | 21                         | 0.46  | 1                          | 0.02  | 22          | 0.21  |
| 石蜈蚣科 Lithobiidae            | 13                         | 0.29  | 8                          | 0.14  | 21          | 0.2   |
| 管蓟马科 Phloeothripidae        | 16                         | 0.35  | 4                          | 0.07  | 20          | 0.19  |
| 圆跳虫科 Sminthuridae           | 14                         | 0.31  |                            |       | 14          | 0.14  |
| 长角跳虫科 Entomobryidae         | 8                          | 0.18  | 6                          | 0.1   | 14          | 0.14  |
| 花萤科幼虫 Cantharidae larvae    |                            |       | 13                         | 0.23  | 13          | 0.13  |
| 隐翅虫科 Staphylinidae          | 1                          | 0.02  | 10                         | 0.17  | 11          | 0.11  |
| 隐翅虫科幼虫 Staphylinidae laevae | 8                          | 0.18  | 1                          | 0.02  | 9           | 0.09  |
| 蟹蛛科 Thomisidae              | 6                          | 0.13  | 1                          | 0.02  | 7           | 0.07  |
| 地蜈蚣科 Geophilidae            |                            |       | 6                          | 0.1   | 6           | 0.06  |
| 步甲科 Carabidae               | 3                          | 0.07  | 2                          | 0.03  | 5           | 0.05  |
| 缨翅目 Thysanoptera            | 1                          | 0.02  | 4                          | 0.07  | 5           | 0.05  |
| 鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae    | 3                          | 0.07  | 1                          | 0.02  | 4           | 0.04  |
| 象甲科 Curculionidae           |                            |       | 4                          | 0.07  | 4           | 0.04  |
| 啮虫科 Psocidae                |                            |       | 4                          | 0.07  | 4           | 0.04  |
| 地么蚣科 Geophilellidae         |                            |       | 4                          | 0.07  | 4           | 0.04  |
| 鳞跳虫科 Tomoceridae            |                            |       | 3                          | 0.05  | 3           | 0.03  |
| 萤科幼虫 Lampyridae larvae      |                            |       | 3                          | 0.05  | 3           | 0.03  |
| 摇蚊科 Chironomidae            | 3                          | 0.07  |                            |       | 3           | 0.03  |
| 步甲科幼虫 Carabidae larvae      | 2                          | 0.04  |                            |       | 2           | 0.02  |
| 叩甲科幼虫 Elateridae larvae     |                            |       | 2                          | 0.03  | 2           | 0.02  |
| 么蚣科 Scolopendrellidae       |                            |       | 2                          | 0.03  | 2           | 0.02  |
| 拟态蛛科 Mimetidae              |                            |       | 1                          | 0.02  | 1           | 0.01  |
| 马陆目 Juliformia              |                            |       | 1                          | 0.02  | 1           | 0.01  |
| 叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae  |                            |       | 1                          | 0.02  | 1           | 0.01  |
| 夜蛾科幼虫 Noctuidae larvae      |                            |       | 1                          | 0.02  | 1           | 0.01  |
| 长蝽科 Lygaeidae               | 1                          | 0.02  |                            |       | 1           | 0.01  |
| 总个体数 Total individual       | 4535                       |       | 5751                       |       | 10286       |       |
| 类群数 Group number            | 24                         |       | 32                         |       | 37          |       |

3.2 土壤动物的水平结构及时间动态

由图 1 可以看出,无论在哪个月份下部苔原亚带的个体数均多于上部苔原亚带,除 7 月外,下部苔原亚带的类群数也多于上部苔原亚带。两个亚带土

壤动物的个体数都是先减后增,上部苔原亚带从 5 月的 2440 个降到 7 月的 796 个,9 月时上升到 1299 个,而下部苔原亚带各月份土壤动物个体数分别为 2696 个、1086 个和 1969 个;两个亚带类群数均呈现

减少的趋势,上部苔原亚带在 5 月和 7 月保持不变,之后减少,下部苔原亚带在 5 月相对多,7 月和 9 月没有变化。经多因素方差分析(表 3)和 LSD 多重比较分析,5 月土壤动物的个体数显著大于 7 月( $P <$

0.001)和 9 月( $P=0.012$ ),而两个亚带间没有显著差异。表明土壤动物的个体数随生境和时间变化有很大波动,而类群数变化较小。

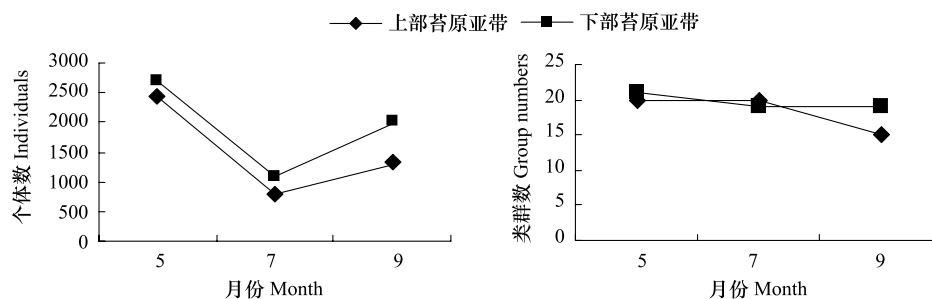


图 1 土壤动物的个体数和类群数(平均值±标准误)

Fig.1 Individual number and group number of soil fauna (Mean±SE)

为了更好地了解不同类群土壤动物的水平结构,选取研究区甲螨亚目、革螨亚目、辐螨亚目、节跳虫科、山跳虫科、球角跳虫科和线蚓科 7 个主要类群进行比较(图 2)。由图 2 可以看出,下部苔原亚带各土壤动物类群的个体数要大于上部苔原亚带,特别是在 5 月份下部苔原亚带球角跳虫科和山跳虫科的个体数显著大于上部苔原亚带( $P=0.038$ ,  $P=0.003$ )。在土壤动物的时间变化方面,螨类在 7 月份数量最少,9 月份数量最多,特别是甲螨在上部苔原亚带和下部苔原亚带两个生境都有显著的变化( $P=0.002$ ,  $P=0.014$ );而弹尾目在 5 月份个体数最多,尤其是在下部苔原亚带,节跳虫科、球角跳虫科和山跳虫科 5 月份都显著大于其它两个月份( $P=0.029$ ,  $P=0.031$ ,  $P=0.009$ );线蚓科在 7 月份个体数最多。说明不同类群土壤动物的个体数存在生境和时间上的波动。

### 3.3 土壤动物的垂直结构及时间动态

土壤动物的个体数和类群数总体上随土壤深度的增加而降低,不同月份的垂直分布情况有一定差异(表 2)。从个体数来看,上部苔原亚带在 5 月凋落物层中最多,下部苔原亚带同样是在 5 月个体数最多,但出现在 0—5 cm 层。从类群数来看,上部苔原亚带在 7 月凋落物层中最多(18 类),下部苔原亚带在 7 和 9 月最多(15 类),但出现在 0—5 cm 层。经多因素方差分析(表 3)表明土壤动物个体数在各层和月份之间存在显著差异, LSD 多重比较分析显示 0—5 cm 层显著多于其它 3 层( $P < 0.001$ ),并且取样层与时间、取样层与生境以及三者的交互作用都对土壤动物个体数有显著的影响; LSD 多重比较分析显示 0—5 cm 层土壤动物类群数也显著多于凋落物层、5—10 cm 层、10—15 cm 层( $P=0.024$ ,  $P < 0.001$ ,  $P < 0.001$ ),取样层与时间、取样层与生境的交互作用都对土壤动物类群数有显著的影响。

表 2 苔原带土壤动物的垂直结构

Table 2 Vertical structure of soil fauna in the tundra

|                  | 月份<br>Month | 个体数 Individual number |        |         |          | 类群数 Group number     |        |         |          |
|------------------|-------------|-----------------------|--------|---------|----------|----------------------|--------|---------|----------|
|                  |             | 凋落物层<br>Litter layer  | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—15 cm | 凋落物层<br>Litter layer | 0—5 cm | 5—10 cm | 10—15 cm |
| 上部苔原亚带           | 5           | 1132                  | 864    | 148     | 296      | 17                   | 13     | 9       | 9        |
| The upper tundra | 7           | 347                   | 350    | 70      | 29       | 18                   | 14     | 7       | 5        |
|                  | 9           | 165                   | 677    | 262     | 195      | 9                    | 15     | 7       | 6        |
| 下部苔原亚带           | 5           | 200                   | 2051   | 279     | 166      | 12                   | 14     | 11      | 11       |
| The lower tundra | 7           | 438                   | 391    | 222     | 35       | 14                   | 15     | 10      | 6        |
|                  | 9           | 282                   | 1120   | 283     | 284      | 9                    | 15     | 14      | 12       |



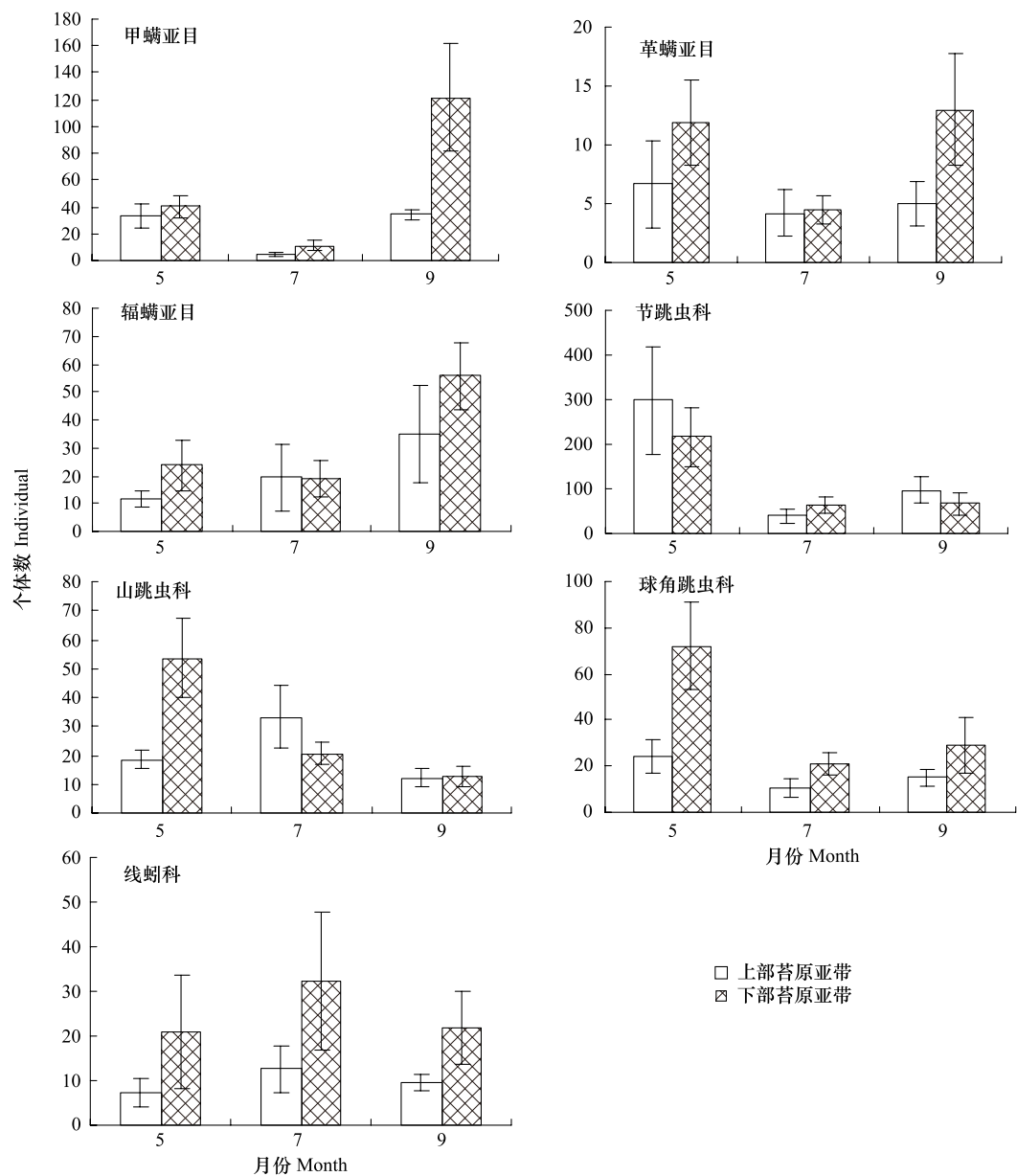


图2 主要土壤动物类群的水平结构特征(平均值±标准误)  
Fig.2 Horizontal structure of main soil fauna (Mean±SE)

表3 土壤动物数量的多因素方差分析

|                              | 个体数 Individual number |        |         | 类群数 Group number |        |         |
|------------------------------|-----------------------|--------|---------|------------------|--------|---------|
|                              | df                    | F      | P       | df               | F      | P       |
| 土层 Layer                     | 3                     | 20.612 | < 0.001 | 3                | 18.113 | < 0.001 |
| 月份 Month                     | 2                     | 9.92   | < 0.001 | 2                | 2.806  | 0.064   |
| 生境 Habitat                   | 1                     | 1.834  | 0.178   | 1                | 9.464  | 0.003   |
| 土层×月份 Layer×Month            | 6                     | 3.898  | 0.001   | 6                | 6.23   | < 0.001 |
| 土层×生境 Layer×Habitat          | 3                     | 5.027  | 0.003   | 3                | 3.23   | 0.025   |
| 月份×生境 Month×Habitat          | 2                     | 0.197  | 0.822   | 2                | 0.193  | 0.825   |
| 土层×月份×生境 Layer×Month×Habitat | 6                     | 3.472  | 0.003   | 6                | 0.22   | 0.97    |

土壤动物主要类群在各层之间也存在较大差异 (表4)。对于螨类,上部苔原亚带9月甲螨亚目

表 4 苔原带主要土壤动物类群的垂直结构特征(平均值±标准误)

| Table 4 Vertical structure of main soil fauna in the tundra (Mean±SE) |   |                         |  |              |            |                         |                      |  |               |               |             |
|-----------------------------------------------------------------------|---|-------------------------|--|--------------|------------|-------------------------|----------------------|--|---------------|---------------|-------------|
| 月份<br>Month                                                           |   | 上部苔原亚带 The upper tundra |  |              |            | 下部苔原亚带 The lower tundra |                      |  |               |               |             |
|                                                                       |   | 凋落物层<br>Litter layer    |  | 0—5 cm       | 5—10 cm    | 10—15 cm                | 凋落物层<br>Litter layer |  | 0—5 cm        | 5—10 cm       | 10—15 cm    |
| 甲螨亚目                                                                  | 5 | 14.83±5.78              |  | 11±3.44      | 5.83±3.03  | 1.67±1.17               | 7.67±2.46b           |  | 24.17±6.68a   | 4.50±1.20b    | 4±2.25b     |
|                                                                       | 7 | 2.67±1.15               |  | 1.50±1.15    | 0±0        | 0±0                     | 8.17±4.56            |  | 2.80±0.97     | 0.80±0.80     | 0±0         |
|                                                                       | 9 | 60±3.36b                |  | 265±3.57a    | 1.83±0.91b | 0±0b                    | 32±14.25ab           |  | 72.67±26.10a  | 8.67±3.29b    | 8.17±4.32b  |
| 革螨亚目                                                                  | 5 | 5.67±3.43               |  | 0.33±0.33    | 0.50±0.50  | 0.17±0.17               | 3±1.13b              |  | 7.80±2.27a    | 1.60±1.17b    | 1±0.63b     |
|                                                                       | 7 | 1.50±0.76               |  | 2.67±1.86    | 0±0        | 0±0                     | 1.67±0.67            |  | 2.80±1.39     | 0.60±0.25     | 0±0         |
| 辐螨亚目                                                                  | 9 | 0.50±0.34b              |  | 4.50±1.95a   | 0±0b       | 0±0b                    | 0.50±0.50            |  | 7.50±3.13     | 2.17±1.28     | 2.83±1.05   |
|                                                                       | 5 | 3±1.75                  |  | 3.83±0.98    | 3.83±2.12  | 1±0.68                  | 3.50±2.43b           |  | 15.67±6.09a   | 3.50±1.61b    | 1.17±0.48b  |
| Actinedida                                                            | 7 | 7.50±5.03               |  | 10.83±7.39   | 0.67±0.67  | 0.33±0.33               | 2.83±1.14            |  | 8±3.26        | 8.80±4.59     | 0.67±0.33   |
| 节跳虫科                                                                  | 9 | 7.83±6.05               |  | 7.33±4.04    | 11.33±7.01 | 8.50±5.41               | 6.83±3.61            |  | 23.83±6.37    | 11.67±8.12    | 13.33±4.81  |
|                                                                       | 5 | 140.67±70.57            |  | 108.83±65.99 | 5.33±1.23  | 43±40.42                | 6.17±1.78b           |  | 195.50±66.83a | 11±3.10b      | 4.50±1.23b  |
| Isotomidae                                                            | 7 | 15.67±6.38              |  | 21.50±17     | 3.17±0.95  | 0±0                     | 35±10.38a            |  | 10.33±3.60b   | 19.40±10.60ab | 1.40±0.51b  |
| 山跳虫科                                                                  | 9 | 6.67±2.43               |  | 55.67±24.52  | 23.17±7.17 | 11.33±3.04              | 2.67±1.67b           |  | 50±17.60a     | 6.33±4.23b    | 7±4.51b     |
|                                                                       | 5 | 6.67±2.82               |  | 8.33±3.06    | 2.67±1.89  | 0.67±0.33               | 6.50±1.80b           |  | 38.67±11.06a  | 7.17±2.65b    | 1.17±0.40b  |
| Pseudoscorpionidae                                                    | 7 | 15±5.24                 |  | 8.17±2.52    | 6.33±4.62  | 3.67±3.67               | 10.50±2.83a          |  | 6±2.22ab      | 3.50±2.20b    | 0.80±0.37b  |
| 球角跳虫科                                                                 | 9 | 2.17±0.98               |  | 4.17±0.7     | 2.50±1.02  | 3.33±2.58               | 1.17±0.65b           |  | 8.83±3.03a    | 1.33±0.49b    | 1.50±1.12b  |
|                                                                       | 5 | 12±5.03                 |  | 7.33±3.11    | 3±1.03     | 2±1.23                  | 4±1.39b              |  | 46.67±11.38a  | 9.67±3.20b    | 11.83±5.24b |
| Hypogastruridae                                                       | 7 | 5.67±2.95               |  | 4.5±2.94     | 0.33±0.21  | 0.17±0.17               | 6.33±2.63            |  | 8±2.89        | 4.67±1.89     | 2.20±1.07   |
| 线蚓科                                                                   | 9 | 1.33±0.49               |  | 6.50±1.73    | 1.50±1.12  | 5.67±2.29               | 2.83±2.64            |  | 10.33±5.46    | 63.33±5.16    | 9.50±3.27   |
|                                                                       | 5 | 2.33±1.38               |  | 2±0.93       | 3±1.31     | 0.5±0.25                | 0.33±0.21            |  | 10±4.94       | 8.67±6.89     | 2.83±1.08   |
| Enchytraeidae                                                         | 7 | 5.33±2.65               |  | 7±3.93       | 0.67±0.33  | 0.5±0.25                | 6.81±3               |  | 25.81±12      | 3.16±1.35     | 1.2±0.5     |
|                                                                       | 9 | 0±0                     |  | 3.45±1.28    | 2.83±1.14  | 2.83±1.20               | 0.33±0.21            |  | 10.15±5.33    | 8.83±2.27     | 3.83±1.22   |

同行内不同小写字母表示样地间差异显著 ( $P < 0.05$ )

( $P < 0.01$ )和革螨亚目( $P < 0.05$ )在0—5 cm土层显著高于其它几层,下部苔原亚带5月甲螨亚目、革螨亚目、辐螨亚目以及9月的甲螨亚目也有同样的表现( $P=0.03, P=0.011, P=0.027, P=0.022$ ),其它月份各层之间没有显著差异( $P > 0.05$ )。弹尾目只有下部苔原亚带存在显著差异,5月的球角跳虫科以及各月的节跳虫科和山跳虫科在各层之间存在显著差异( $P=0.001, P=0.001, P=0.036, P=0.005, P=0.001, P=0.04, P=0.009$ );两个亚带中线蚓科均在0—5 cm土层个体数量最多。从总体上来看,上部苔原亚带土壤动物的垂直分布比下部苔原亚带容易受时间变化的影响,不同土壤动物的垂直分布随时间和生境的不同而有所不同。

### 3.4 土壤动物群落多样性特征

研究表明,下部苔原亚带土壤动物多样性高于上部苔原亚带,在下部苔原亚带共获得土壤动物32类,而在上部苔原亚带获得24类;上、下两个亚带土壤动物多样性随月份变化都有递减的趋势。

图3显示的是两个亚带土壤动物多样性特征指

数的情况。各月份,上部苔原亚带土壤动物的多样性指数和均匀度指数均低于下部苔原亚带。7月,上部苔原亚带土壤动物的丰富度指数高于下部苔原亚带,5月和9月低于下部苔原亚带。各月份,上部苔原亚带土壤动物的优势度指数高于下部。下部苔原亚带的植被组成较复杂,能为土壤动物提供更多的食物和栖息环境,土壤动物组成较丰富,所以多样性指数较高;并且上部苔原亚带各土壤动物的所占比例差异较大,仅优势类群节跳虫科就占该亚带的57.55%,导致优势度指数较高。

上部和下部苔原亚带土壤动物的多样性指数、均匀度指数和优势度指数均为7月>9月>5月,而优势度指数在5月最高。虽然7月土壤动物类群数不是最多,但是各类群之间个体数量差异最小,群落组成更加均匀,所以多样性指数最高;而5月土壤动物类群数虽然最多,但土壤动物的个体数量差异很大,尤其是节跳虫科和甲螨亚目占有很大的比例,多样性指数最低,优势度指数最高。说明生境差异和时间变化对土壤动物的多样性有一定的影响。

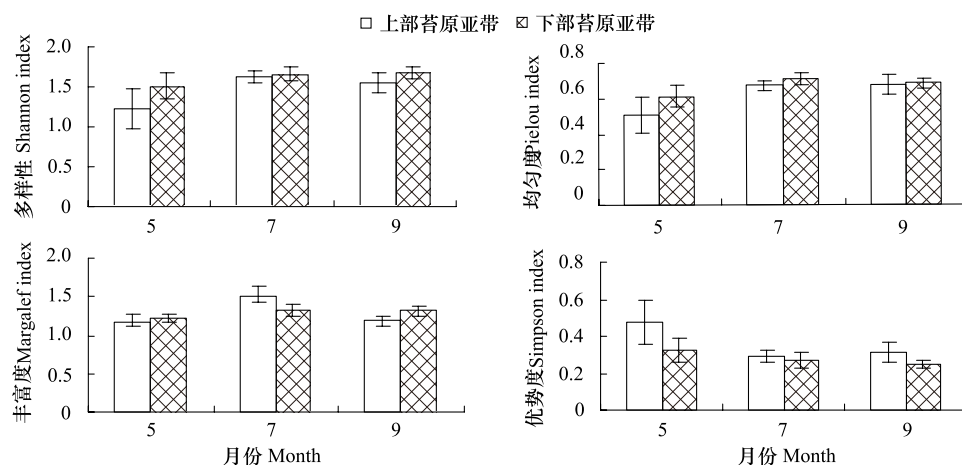


图3 土壤动物的多样性特征(平均值±标准误)

Fig.3 Diversity characteristics of soil fauna (Mean±SE)

### 3.5 土壤动物群落相似性特征

苔原带土壤动物群落的相似性特征如表5所示。各月份苔原带两个亚带之间土壤动物的Sorenson相似性均处于中等相似水平,表明两个亚带之间土壤动物群落物种组成存在一定的相似性;5月和7月两个亚带之间土壤动物群落Morisita-Horn系数均值在0.9以上,9月为0.78,在5月和7月下部苔原亚带土壤动物个体数比上部分别多256只和290只,而9月份多670只,表明9月两个亚带之间

土壤动物各类群的相对数量差异比5月和7月时大。

表5 土壤动物群落相似性特征

Table 5 Similarities of soil fauna

|                   | 5月<br>May | 7月<br>July | 9月<br>September |
|-------------------|-----------|------------|-----------------|
| Sorenson 相似性      | 0.68      | 0.67       | 0.65            |
| Morisita-Horn 相似性 | 0.90      | 0.91       | 0.78            |

## 4 讨论

### 4.1 不同生境土壤动物群落组成与多样性

土壤动物组成和分布受植被组成特征、湿度和温度等多种因素的影响<sup>[18-20]</sup>,不同生境中土壤动物的组成和结构存在差异<sup>[21-22]</sup>,植被条件越优越的生境,土壤动物的多样性越高<sup>[23-24]</sup>。上部苔原亚带以苔藓地衣为主,下部苔原亚带以低矮灌木为主,植物种类也相对丰富,更适宜土壤动物的取食与繁殖;另外,下部苔原亚带海拔低,气温高,土壤养分含量更高,较适宜土壤动物的生存与活动。因此,上部苔原亚带土壤动物群落的类群数和多样性等均小于下部苔原亚带。王邵军等<sup>[25]</sup>在武夷山研究表明土壤动物的类群数和多样性均随海拔升高而降低,与此研究结论相近。

两个亚带土壤动物的 Sorenson 和 Morisita-Horn 相似性指数显著不同,也表明两个亚带土壤动物在物种组成和各类群的相对数量均存在一定的差异。螨类、跳虫和线蚓科分布广、适应性强,在两个亚带均为优势类群或常见类群,但是不同亚带其个体数量不同;稀有类群在两个亚带的变化较大,特有类群分别为 4 和 13 类。黄旭等<sup>[27]</sup>在川西高山研究表明不同植被类型下的土壤动物组成不同,Zhu Xinyu 等<sup>[26]</sup>的研究也证明不同的植被条件能够影响土壤动物群落的物种组成和各类群的数量。因此,生境条件对土壤动物群落的组成和多样性有一定的影响。

### 4.2 土壤动物多样性的时间变化

不同季节的降水、气温以及植被的差异是影响土壤动物数量和多样性的主要因素<sup>[27-29]</sup>。研究发现,各时段土壤动物的类群数变化不大,但是土壤动物数量变化很大。7 月与其它两个月份相比,土壤动物主要类群螨类和跳虫的数量显著减少,而一些稀有类群数量有所增加,虽然土壤动物个体数在 7 月份最少,而优势度指数降低,多样性指数、丰富度指数和均匀度指数最高。张洪芝等<sup>[30]</sup>在若尔盖高寒草甸地区的研究表明,土壤动物的个体数也在 7 月份最少,而多样性指数在 10 月份最大,与此研究结果存在差异,这可能是地区差异的原因。

### 4.3 土壤动物的垂直结构

土壤动物容易受自然灾害和干扰因素的影响

响<sup>[31]</sup>。长白山苔原带温度低,植被低矮,凋落物层土壤动物缺乏相对稳定的栖息环境,容易受到大风和降水等因素的影响,因此,凋落物层土壤动物的个体数和类群数少于 0—5 cm 土层。

土壤动物的垂直结构受土壤理化性质以及植被条件的影响<sup>[18,32]</sup>,土壤温湿度的季节变化是影响土壤动物垂直结构季节动态的主要因子<sup>[33-34]</sup>,而不同土壤动物对土壤温湿度等环境因子的响应不同<sup>[35-36]</sup>。上部和下部苔原带植被组成和土壤养分含量差异较大,由海拔变化引起的温湿度变化也存在差异,使各层土壤动物种类组成和数量存在差异,如 5 月和 7 月甲螨亚目在两个亚带的凋落物层最多,而 9 月份凋落物层少于 0—5 cm 土层;5 月份节跳虫科在上部苔原亚带以凋落物层最多,而下部苔原亚带以 0—5 cm 土层最多。

本研究区位于长白山苔原带,由于自然环境非常恶劣,土壤动物的多样性要低于其他自然带<sup>[26,37]</sup>。但是关于苔原带土壤动物与环境因子的相互作用机制研究较少,因此,有待于进一步的研究来揭示其规律。

## 5 结论

(1)在长白山苔原带两个亚带,优势类群为甲螨亚目、节跳虫科和球角跳虫科 3 类,常见类群为革螨亚目、辐螨亚目、山跳虫科和线蚓科 4 类,其余 30 类为稀有类群。两个亚带所捕获个体数分别占总数的 44.09% 和 55.91%,类群数分别为 24 类和 32 类。下部苔原亚带土壤动物群落结构较复杂。

(2)土壤动物的个体数随生境和时间变化有很大波动,而类群数变化较小。下部苔原亚带土壤动物的个体数、类群数要多于上部苔原亚带。两个亚带土壤动物的个体数在 7 月最少,而类群数随着时间的变化有减少的趋势。

(3)上部苔原亚带 5 月个体数和类群数及 7 月类群数均在凋落物层最高,下部苔原亚带 7 月的个体数也有相同的表现,其余均在 0—5 cm 土层最高。0—5 cm 土层向下,土壤动物的个体数和类群数随着土层深度的增加而减少。主要土壤动物的垂直分布随时间和生境的不同而存在差异。

(4)生境差异和时间变化对土壤动物的多样性特征有一定的影响,下部苔原亚带土壤动物多样性



高,两个亚带土壤动物多样性随月份变化都呈递减的趋势。下部苔原亚带土壤动物的多样性指数、丰富度指数和均匀度指数均高于上部苔原亚带,优势度则相反。多样性指数、丰富度指数和均匀度指数的变化为7月最高,而5月最低,优势度指数在5月份最高。

(5) Sorenson 相似性表明两个亚带土壤动物群落物种组成上存在一定的差异;Morisita-Horn 相似性表明,两个亚带之间土壤动物各类群的相对数量差异在9月最大。

#### Reference:

- [ 1 ] Lavelle P, Decaëns T, Aubert M, Barot S, Blouin M, Bureau F, Margerie P, Mora P, Rossic JP. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: S3-S15.
- [ 2 ] 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(5677): 1629-1633.
- [ 3 ] Dong W H, Yin X Q. Transformation of carbon and nitrogen by earthworms in the decomposition processes of Broad-leaved litters. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(2): 166-172.
- [ 4 ] Xia L, Wu F Z, Yang W Q, Tan B. Contribution of soil fauna to the mass loss of *Betula albosinensis* leaf litter at early decomposition stage of subalpine forest litter in western Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 301-306.
- [ 5 ] Song B, Yin X Q, Zhang Y, Dong W H. Dynamics and relationship of Ca, Mg, Fe in litter, soil fauna and soil in *Pinus koraiensis*-Broadleaf mixed forest. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(3): 284-290.
- [ 6 ] Gao M X, Zhang X P. Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 164-174.
- [ 7 ] Yin X Q, Song B, Dong W H, Xin W D, Wang Y Q. A review on the eco-geography of soil fauna in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(3): 333-346.
- [ 8 ] Xin W D, Yin X Q, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in northeastern China. *Journal of Arid Environments*, 2012, 77: 90-95.
- [ 9 ] Wang Q Y, Zhou D M, Cang L, Li L Z, Zhu H W. Indication of soil heavy metal pollution with earthworms and soil microbial biomass carbon in the vicinity of an abandoned copper mine in Eastern Nanjing, China. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45(3): 229-234.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Zhang R Z, Yang M X, Chen P, Zhang T W. Preliminary investigation of soil animal in ecosystems of northern of Changbai Mountains. *Forest Ecosystem Research*, 1980(1): 133-152.
- [ 12 ] Yin X Q, Jiang Y F, Tao Y, An J C, Xin W D. Ecogeographical distribution of soil fauna in *Pinus koraiensis* mixed Broad-leaved forest of Changbai Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 935-940.
- [ 13 ] Tong F C, Jin Z D, Wang Q L, Xiao Y H. Co-occurrence of soil fauna communities with change in altitude on the northern slope of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1723-1728.
- [ 14 ] 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): 1531-1535.
- [ 15 ] Chen P, Zhang Y. Periglacial environment and soil fauna on northern slope of Changbai Mountain. *Scientia Geographica Sinica*, 1983, 3(2): 133-140.
- [ 16 ] Chen P, Yang C B, Zhang Y. Ecogeographical distribution of soil fauna in the Alpine tundra of northern of Changbai Mountains. *Forest Ecosystem Research*, 1983, (3): 119-132.
- [ 17 ] Qian J J. Investigation report of typical vegetation of different belts on northern of Changbai Mountains // Zhang Z Z. Research on Geosystems of the Changbai Mountains (VOL. 1). Changchun: Northern Normal University Press, 2010: 89-115.
- [ 18 ] Liu J L, Yin X Q, Qiu L L. Large-sized soil fauna and soil factors in Zuoja Nature Reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 130-136.
- [ 19 ] Oxbrough A, Irwin S, Kelly T C, O'Halloran J. Ground-dwelling invertebrates in reforested conifer plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(10): 2111-2121.
- [ 20 ] Sandrine S, Nadia A, Lorenzo F, Roberto Z. Relationships between soil fauna communities and humus forms: Response to forest dynamics and solar radiation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1707-1715.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Liu J L, Li F R, Liu Q J, Niu R X. Relationships between ground beetle community distribution and microhabitats in an arid desert shrubland of the middle Heihe River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6389-6398.
- [ 23 ] Moço M K S, Gama-Rodrigues E F, Gama-Rodrigues A C, Machado R C R, Baligar V C. Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3): 347-354.
- [ 24 ] Li Y H, Yang W Q, Luo C D, Wu F Z, Hu J. Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 159-167.
- [ 25 ] Huang X, Wen W Q, Zhang J, Yang W Q, Liu Y, Yan B G, Huang Y M. Soil faunal diversity under typical alpine vegetations in West Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 181-190.
- [ 26 ] Zhu X Y, Gao B J, Yuan S L, Hu Y C. Community structure and seasonal variation of soil arthropods in the forest-steppe ecotone of the mountainous region in Northern Hebei, China. *Journal of*

- Mountain Science, 2010, 7(2): 187-196.
- [27] 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.
- [28] 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(6): 988-994.
- [29] Morón-Ríos A, Rodríguez M Á, Pérez-Camacho L, Rebollo S. Effects of seasonal grazing and precipitation regime on the soil macroinvertebrates of a Mediterranean old-field. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 91-96.
- [30] Zhang H Z, Wu P F, Yang D X, Cui L W, He X J, Xiong Y Q. Dynamics of soil meso-and microfauna communities in Zoigê alpine meadows on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4385-4397.
- [31] Yan S K, Zhang W D, Liu Y X, Fu S L, Li Y L, Wang S L. Impact of heavy snow storm and freezing rain disasters on soil fauna in Chinese fir plantation in southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 65-70.
- [32] Xiao N W, Liu X H, Ge F, Ouyang Z Y. Research on soil faunal community composition and structure in the Gaoligong Mountains National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3576-3584.
- [33] Salamon J A, Scheu S, Schaefer M. The Collembola community of pure and mixed stands of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) of different age. *Pedobiologia*, 2008, 51(5/6): 385-396.
- [34] Briones M J I, Ostle N J, McNamara N P, Poskitt J. Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 315-322.
- [35] Qiu J, Fu R S. The effects of temperature and soil water content for the number of *Oribatida* and *Collembola*. *Journal of Shandong Normal University: Natural Science*, 2004, 19(4): 72-74.
- [36] DuPont S T, Ferris H, Van Horn M. Effects of cover crop quality and quantity on nematode-based soil food webs and nutrient cycling. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(2): 157-167.
- [37] Wu P F, Liu S R, Liu X L. Composition and spatio-temporal changes of soil macroinvertebrates in the biodiversity hotspot of northern Hengduan Mountains, China. *Plant and Soil*, 2012, 357(1/2): 321-338.
- 叶分解中的变化. *生态学报*, 2011, 31(1): 164-174.
- [10] 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.
- [11] 张荣祖, 杨明宪, 陈鹏, 张庭伟. 长白山北坡生态系统土壤动物初步调查. *森林生态系统研究*, 1980(1): 133-152.
- [12] 殷秀琴, 蒋云峰, 陶岩, 安静超, 辛未冬. 长白山红松阔叶混交林土壤动物生态分布. *地理科学*, 2011, 31(8): 935-940.
- [13] 佟富春, 金哲东, 王庆礼, 肖以华. 长白山北坡土壤动物群落物种共有度的海拔梯度变化. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1723-1728.
- [14] 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.
- [15] 陈鹏, 张一. 长白山北坡冰缘环境与土壤动物. *地理科学*, 1983, 3(2): 133-140.
- [16] 陈鹏, 杨秉庚, 张一. 长白山北坡高山苔原带土壤动物的生态分布. *森林生态系统*, 1983, (3): 119-132.
- [17] 钱家驹. 长白山北坡各垂直带的典型植被调查报告 // 张子楨. 长白山地理系统研究(第一辑). 长春: 东北师范大学出版社, 2010: 89-115.
- [18] 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.
- [21] 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.
- [22] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪. 黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境关系研究. *生态学报*, 2010, 30(23): 6389-6398.
- [24] 李艳红, 杨万勤, 罗承德, 吴福忠, 胡杰. 桧-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态. *生态学报*, 2013, 33(1): 159-167.
- [25] 黄旭, 文维全, 张健, 杨万勤, 刘洋, 闫帮国, 黄玉梅. 川西高山典型自然植被土壤动物多样性. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 181-190.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [30] 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 崔丽巍, 何先进, 熊远清. 青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化. *生态学报*, 2011, 31(15): 4385-4397.
- [31] 颜绍馥, 张伟东, 刘燕新, 傅声雷, 李媛良, 汪思龙. 雨雪冰冻灾害干扰对杉木人工林土壤动物的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 65-70.
- [32] 肖能文, 刘向辉, 戈峰, 欧阳志云. 高黎贡山自然保护区大型土壤动物群落特征. *生态学报*, 2009, 29(7): 3576-3584.
- [35] 邱军, 傅荣恕. 土壤温湿度对甲螨和跳虫数量的影响. *山东师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 19(4): 72-74.

#### 参考文献:

- [4] 夏磊, 吴福忠, 杨万勤, 谭波. 川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 301-306.
- [6] 高梅香, 张雪萍. 石灰和 EM 处理条件下土壤动物群落在落

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.3 Feb., 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Research advances and prospects of post-disaster ecological restoration assessment .....  
..... LIU Xiaofu, WANG Wenjie, LI Jing, et al (527)
- The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting .....  
..... PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (537)

### Autecology & Fundamentals

- An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer .....  
..... MA Lu, CAO Wenqing, ZHANG Wenjing, et al (546)
- Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus* .....  
..... FAN Xiaoli, LIN Zhihua, DING Xianlong, et al (555)
- Effect of environmental temperature on thermogenesis and evaporative water loss in Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*) .....  
..... LIN Lin, CAO Mengting, HU Yilin, et al (564)
- Effects of irrigation on plant growth and nitrogen use characteristics of *Calligonum caput-medusae* Schrenk seedlings .....  
..... HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (572)
- Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil .....  
..... ZHU Fan, HONG Xiangqi, YAN Wende, et al (581)
- Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model .....  
..... WEI Xingping, PU Junbing, ZHAO Chunyong (589)
- Monitoring salt and water dynamics in farmland and drainage ditch in a saline environment under reduced drainage intensity .....  
..... PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al (597)

### Population, Community and Ecosystem

- Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland .....  
..... GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang, ZHUO MA Lancuo (605)
- Biotic stress of predators on population of alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Col.: Chrysomelidae) .....  
..... LIU Yufang, LI Fei, GUI Fangyan, et al (613)
- Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter .....  
..... MA Wei, SUN Jun (621)
- The amount and dynamics of litterfall in the natural secondary forest in Mopan Mountain .....  
..... FAN Chunnan, GUO Zhongling, ZHENG Jinping, et al (633)
- Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere .....  
..... LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al (642)
- The basic principle of random forest and its applications in ecology: a case study of *Pinus yunnanensis* .....  
..... ZHANG Lei, Wang Linlin, ZHANG Xudong, et al (650)
- Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance .....  
..... HOU Peng, SHEN Wenming, WANG Qiao, et al (660)
- Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China .....  
..... HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (667)
- The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang .....  
..... HE Guixiang, LI Kaihui, SONG Wei, et al (674)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression (PLS)  
..... MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al (682)
- Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone .....  
..... DONG Linlin, YANG Hao, YU Dongsheng, et al (690)
- Molecular mechanism on carbon dioxide assimilation of autotrophic microorganism and carbon translocation in agricultural soils .....  
..... WU Xiaohong, JIAN Yan, CHEN Xiaojuan, et al (701)

**Resource and Industrial Ecology**

- Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach .....  
..... SUN Yufeng, GUO Quanying (710)
- Assessing synthetic carrying capacity based on AD-AS model: a case study in Coastal Zone, Zhoushan .....  
..... SU Panpan, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (718)

**Urban, Rural and Social Ecology**

- Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression .....  
..... LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (727)

**Research Notes**

- Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi .....  
..... LIANG Ting, TONG Yan'an, LIN Wen, et al (738)
- The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area .....  
..... LIU Xiaoyong, LI Hongxun, LI Jianming, et al (746)
- Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China .....  
..... WANG Zhenhai, YIN Xiuqin, JIANG Yunfeng (755)
- Modeling the total allowable area for coastal reclamation: a case study of Xiamen, China .....  
..... LIN Chenchen, RAO Huanhuan, LIU Yan, et al (766)



# 《生态学报》2014 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,280 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

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 34 卷 第 3 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 3 (February, 2014)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China                                                                                         |
| 广告经营<br>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