

张萌, 冯毅, 伍小刚, 张兴华, 虞超, 周泓杨, 唐天文, 张凤英, 张林, 孙晓铭, 潘开文. 成都龙泉山城市森林公园典型森林群落马陆分布特征及影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (5): 1200-1206

Zhang M, Feng Y, Wu XG, Zhang XH, Yu C, Zhou HY, Tang TW, Zhang FY, Zhang L, Sun XM, Pan KW. Distribution of millipede (Diplopoda) and its influencing factors in the soils of typical forest ecosystems in Chengdu Longquan Mountain Urban Forest Park [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2020, 26 (5): 1200-1206

成都龙泉山城市森林公园典型森林群落马陆分布特征及影响因素

张萌^{1,2} 冯毅^{3,4} 伍小刚¹ 张兴华³ 虞超³ 周泓杨^{1,2} 唐天文^{1,2} 张凤英^{1,2}
张林¹ 孙晓铭¹ 潘开文¹✉

¹中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室 成都 610041

²中国科学院大学 北京 100049

³成都龙泉山城市森林公园管委会 成都 610000

⁴成都市农林科学院 成都 611130

摘要 马陆是陆地生态系统主要的腐食性大型节肢动物, 是土壤生态系统重要的分解者, 但我国对森林土壤马陆多样性的研究鲜见报道. 采用样方法, 对成都龙泉山城市森林公园典型植物群落(天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林)马陆多样性、密度和生物量进行调查, 分析马陆密度与土壤化学性质间的关系. 共发现马陆2目4科7种, 其中蜚蠊(*Spiroboleus walkeri*)是优势种. 马陆个体数和物种数在天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林中依次递减. 马陆具有明显的表聚现象, 集中分布在0-5 cm土层. 天然常绿阔叶林马陆密度和多样性大于人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林. 人工针阔叶混交林马陆平均体长显著大于天然和人工常绿阔叶林, 马陆生物量在人工常绿阔叶林中最高. 幂函数模型能较好地模拟山蛩科体长-体重的回归关系. 土壤含水量、总磷含量、C/N和C/P是影响龙泉山城市森林公园马陆分布的主要因素, 马陆密度与土壤含水量、总磷含量呈显著线性正相关, 与土壤C/N、C/P呈显著线性负相关. 本研究表明龙泉山城市森林公园马陆分布与森林类型、土壤含水率、总磷含量等环境因子密切相关. (图3 表4 参39)

关键词 马陆; 生物多样性; 生物量; 环境因子; 龙泉山城市森林公园

Distribution of millipede (Diplopoda) and its influencing factors in the soils of typical forest ecosystems in Chengdu Longquan Mountain Urban Forest Park

ZHANG Meng^{1,2}, Feng Yi^{3,4}, WU Xiaogang¹, ZHANG Xinghua³, YU Chao³, ZHOU Hongyang^{1,2}, TANG Tianwen^{1,2}, ZHANG Fengying^{1,2}, ZHANG Lin¹, SUN Xiaoming¹ & PAN Kaiwen¹✉

¹ Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Management Committee of Chengdu Longquanshan Urban Forest Park, Chengdu 610000, China

⁴ Chengdu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Chengdu 611130, China

Abstract The millipede (Diplopoda) is an important large soil arthropod in terrestrial ecosystems and plays a vital role in the degradation of organic matter. However, there has been limited investigations of millipede biodiversity in China's forest ecosystems. The species, density, and biomass of millipedes were studied using a quadrat survey in natural evergreen broad-leaved forest, artificial evergreen broad-leaved forest, and coniferous and broad-leaved mixed forests in Longquan Mountain Urban Forest Park, Chengdu. The relationship between the millipede densities and soil factors were analyzed using correlation analysis. Regression models were used to stimulate the relationship between biomass and body length of the Spirobolidae family of millipedes. Results indicated that seven species belong to two orders and four subfamilies. *Spiroboleus walkeri* was the dominant species. The number of individuals and species was the highest in the natural evergreen broad-leaved forest, followed by artificial evergreen broad-leaved forest. The millipedes were mainly distributed in the surface soil, and their abundance decreased with soil depth. The diversity and density of millipedes in the natural evergreen

收稿日期 Received: 2019-10-28 接受日期 Accepted: 2020-01-08

国家重点研发计划项目(2016YFC0502101)、国家自然科学基金项目(31961133012)和成都龙泉山城市森林公园生态监测项目资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0502101), the National Natural Science Foundation of China (31961133012) and the Ecological Monitoring Project of Chengdu Longquan Mountain Urban Forest Park

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: pankw@cib.ac.cn)

broad-leaved forest were higher than those in the artificial evergreen broad-leaved forest and the coniferous and broad-leaved mixed forest. The average length of the millipedes in the artificial coniferous and broad-leaved mixed forest was significantly greater than that of the natural and artificial evergreen broad-leaved forest. The millipede biomass was the highest in the artificial evergreen broad-leaved forest. The power model was effective for establishing the regression relationship of the body length and weight of the Spirobolidae. The millipede density was significantly positively correlated with soil moisture and total phosphorus content, and negatively with the C/N and C/P of the forest soil. The results suggested that forest type, soil moisture, total phosphorus, C/N, and C/P were the key factors affecting the millipede distribution and density in soils.

Keywords Millipede; biodiversity; biomass; environmental factor; Longquan Mountain Urban Forest Park

腐食性土壤动物以枯枝、落叶、朽木、枯根、动物尸体等动植物残体和排泄物为营养源，是生态系统重要的分解者。马陆又称“千足虫”，属节肢动物门（Arthropoda）多足类（Myriapoda）倍足纲（Dipolopoda）动物，是温带、亚热带和热带森林生态系统腐食性土壤动物的重要组成部分^[1]，在全球范围内约有80 000个物种或亚种，但仅有约12 000个物种被描述^[2]。马陆广布全世界，在森林、草地、高山、洞穴、农田以及城镇绿地和居民区皆可发现^[3]，且数量丰富。

马陆作为陆地生态系统分解者和养分周转调控者，在有机质初始粉碎和降解过程中起着至关重要的作用^[4]。马陆可通过直接和间接作用对凋落物进行分解^[5]，直接作用包括马陆取食消耗凋落物，有研究发现马陆每年可转化凋落物输入量的36%^[6]；马陆的间接作用主要体现在以下3方面：（1）马陆通过破碎凋落物，增大凋落物与微生物接触的表面积^[3]，增强微生物的活性，从而加速凋落物分解速率^[7]。（2）马陆可将凋落物与土壤混合，通过运动将凋落物埋藏到更深土层中，有利于凋落物保存。（3）通过在土壤层之间的运动，马陆可提高土壤通气性，改善土壤条件，进而影响凋落物分解^[8]。此外，由于马陆耐受性较差，能够对环境变化迅速作出反应，因此可作为指示者用于监测生态系统的健康状况以及环境变化^[1]。尽管马陆具有重要的生态功能，但由于马陆物种的多样性和复杂性，目前对它们的研究非常有限^[9-10]，主要停留在分类描述方面。

自20世纪50年代以来，马陆的生态功能逐渐受到生态学家的关注，国际上仅对欧洲、非洲、印度等少数地区的马陆分布和多样性进行了一定的调查研究。Mbenoun等对原始和次生低地热带雨林马陆的多样性进行了调查，发现27种马陆，研究表明，尽管两个生境间马陆物种丰富度相似，但不同生境的物种组成不同^[1]。Slavomír等研究斯洛伐克植物园中的马陆群落，发现树种影响马陆群落组成，马陆物种丰富度和生物多样性受土壤氮含量的影响^[11]。对印度人工混交林和半常绿森林的研究发现，马陆丰富度和生物量与降水量呈正相关^[12-13]。国内对马陆的研究鲜有报道^[9]，且马陆的相关研究多集中于热带

和温带森林生态系统，亚热带地区很少涉及，与蚯蚓、线虫、跳虫等土壤动物类群相比，在研究的深度和广度方面相差甚远^[14-19]。

成都龙泉山城市森林公园位于龙泉山脉成都段，南北90 km，东西10-12 km，面积1 275 km²，涉及6个区（市）县38个乡镇（街道）268个村，是全球最大的城市“绿心”。研究成都龙泉山城市森林公园森林生态系统的结构和功能，对城市森林的可持续管理和持续供给城市居民的生态福祉有重要意义。本研究旨在调查龙泉山城市森林公园典型植物群落中马陆的分布格局，比较不同林型马陆群落组成和结构的差异，分析影响马陆分布的主要环境因子，为我国马陆多样性研究提供基础数据，为该区域森林生态系统的可持续经营与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

龙泉山城市森林公园位于四川盆地，为成都平原与川中丘陵的界山，属中亚热带湿润季风气候，温暖湿润，年均气温15.9℃，年均降水量974.4 mm，夏季气候炎热，雨量集中，冬季气候干燥，雨量少，地带性植被为中亚热带常绿阔叶林。本研究选择该区域典型的森林类型，包括天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林作为研究样地，各样地的基本信息如表1所示。

1.2 马陆及土壤样品采集

在每个森林群落中，设置3个20 m × 20 m的样地，在每个样地的四角和中心点各设置1个50 cm × 50 cm的小样方采集马陆和土壤样品，按0-5 cm、5-10 cm、10-15 cm土层分层采样。采用手捡法收集马陆，放于75%乙醇中固定并带回实验室。在采集马陆的同时，采集土壤供室内理化性质分析，用环刀取原状土用于土壤容重等物理性质测定。采集时间为2019年8月。

表1 研究样地概况
Table 1 Basic conditions of the sample plots

林型 Forest type	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation (h/m)	主要植物种类 Main plant species
I	104.288°E	30.502°N	998	桢楠、黑壳楠、野扇花、方竹、棕榈、长叶实蕨、蝴蝶花、吉祥草等 <i>Phoebe zhennan</i> , <i>Lindera megaphylla</i> , <i>Sarcococca ruscifolia</i> , <i>Chimonobambusa quadrangularis</i> , <i>Trachycarpus fortunei</i> , <i>Bolbitis heteroclita</i> , <i>Iris japonica</i> , <i>Reineckia carnea</i>
II	104.307°E	30.527°N	948	香樟、女贞、天竺桂、枇杷等 <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Ligustrum lucidum</i> , <i>Cinnamomum pedunculatum</i> , <i>Eriobotrya japonica</i>
III	104.293°E	30.526°N	648	麻栎、马尾松等 <i>Quercus acutissima</i> , <i>Pinus massoniana</i>

I：天然常绿阔叶林；II：人工常绿阔叶林；III：人工针阔叶混交林。
I: Natural evergreen broad-leaved forest; II: Artificial evergreen broad-leaved forest; III: Artificial coniferous and broad-leaved mixed forest.

1.3 样品鉴定及测定

将马陆置于双目解剖镜下,参考《中国土壤动物检索图鉴》^[20]、《中国亚热带土壤动物》^[21]进行数量统计和分类鉴定,一般鉴定到属,个别类群鉴定到种.采用烘干法测定马陆的生物量,使用Image J程序^[22]测量马陆体长数据.

采用烘干法测定土壤样品的含水量;用环刀法测定土壤容重;采用电位法(GB7859-87)测定土壤pH;用元素分析仪(Vario MACRO, Elementar Analysesysteme GmbH, Hanau, Germany)测定土壤总有机碳和总氮含量;用酸溶法测定土壤总磷含量;用原子吸收分光光度法测定全钙含量.

1.4 数据分析

运用单因素方差分析和Duncan多重比较法分析森林类型对马陆多样性的影响,显著性水平小于0.05时,视为通过显著性检验.利用回归模型模拟山蛩科马陆的体长-体重回归关系.用双变量相关分析法,计算马陆密度与土壤含水量、土壤容重、pH、总有机碳、总氮、总磷、C/N、C/P、全钙含量等之间的Pearson相关系数.计算各植物群落马陆的Shannon-Wiener多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J_s)、Margalef丰富度指数(D)和Simposon优势度指数(C).用SPSS 22.0和Origin 2017软件进行数据统计处理与绘图.

2 结果与分析

2.1 马陆群落分布与多样性

采集到的马陆分属于山蛩科Spirobolidae、矛带马陆科Doratodesmidae、奇马陆科Paradoxosomatidae和带马陆科Polydesmidae,共2目7种108头.天然常绿阔叶林中采集到4科7种47头,占个体总数的43.5%,人工常绿阔叶林采集到3科4种42头,占个体总数的38.9%,人工针阔叶混交林采集到2科2种19头,占个体总数的17.6%.浙山蛩(*Spirobolus walkeri*)为3种植物群落的共同优势种,分别占总数的38.3%、57.1%和94.7%.

3种林型中,天然常绿阔叶林马陆的物种数和个体数量最多,本次调查发现的所有马陆类群在该群落中均有分布.人工针阔叶混交林分布的马陆数量较少,仅分离到2种19头马陆.0-5cm土壤层马陆个体数和物种数均显著高于5-10 cm和10-15 cm土壤层($P < 0.05$) (图1).人工针阔叶混交林5 cm以下土壤层因沙石较多等原因,未收集到马陆.天然常绿阔叶林和人工常绿阔叶林5-10 cm和10-15 cm土壤层马陆个体数和物

种数没有显著性的差异($P > 0.05$).

3种森林类型的 H' 、 J_s 和 D 的大小顺序均为天然常绿阔叶林>人工常绿阔叶林>人工针阔叶混交林,人工针阔叶混交林的 C 大于天然常绿阔叶林和人工常绿阔叶林(图2),这是由于在人工针阔叶混交林中仅采集到两个马陆物种,且浙山蛩占总数的94.7%所致.

2.2 马陆密度、体长与生物量

在龙泉山森林中,马陆密度在天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林中依次减少(表2).天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林马陆平均密度分别为20.89 ind./m²、18.67 ind./m²和8.44 ind./m²,不同林型间马陆密度无显著差异.山蛩科在天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林中的密度分别为8 ind./m²、10.67 ind./m²和8 ind./m².

人工针阔叶混交林马陆平均体长显著大于天然常绿阔叶林和人工常绿阔叶林($P \leq 0.05$).天然常绿阔叶林、人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林马陆平均体长分别为25.59 mm、26.47 mm、62.72 mm.

马陆生物量在人工常绿阔叶林、人工针阔叶混交林和天然常绿阔叶林中依次减少(表2),但差异不显著.人工常绿阔叶林、人工针阔叶混交林、天然常绿阔叶林马陆平均生物量分别为8.53 g/m²、8.47 g/m²和7.91 g/m².这可能与人工常绿阔叶林马陆个体数量较多且体型较大,但天然常绿阔叶林小体型马陆较多有关.山蛩科生物量占马陆总生物量的70%以上,对体长和体重进行回归分析发现,体长和体重高度相关,山蛩科体长和体重之间的关系以幂函数模型来描述为佳(表3).

2.3 马陆与环境因子的关系

人工针阔叶混交林土壤含水量显著小于天然常绿阔叶林和人工常绿阔叶林($P \leq 0.05$),仅为18.84%(表4),这是由于人工针阔叶混交林郁闭度低、土壤较薄所致.土壤容重在人工常绿阔叶林、人工针阔叶混交林和天然常绿阔叶林中逐渐降低.所有林型土壤pH变化范围为4.5-6.5,偏酸性.天然常绿阔叶林总有机碳和全钙含量相对较高,总氮和总磷显著高于人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林($P \leq 0.05$).

马陆密度分别与土壤含水量、总磷含量呈显著线性正相关($r = 0.652, 0.631; P = 0.029, 0.034$;图3),而与土壤C/N、C/P呈显著线性负相关($r = -0.589, -0.792; P = 0.048, 0.006$;图3).

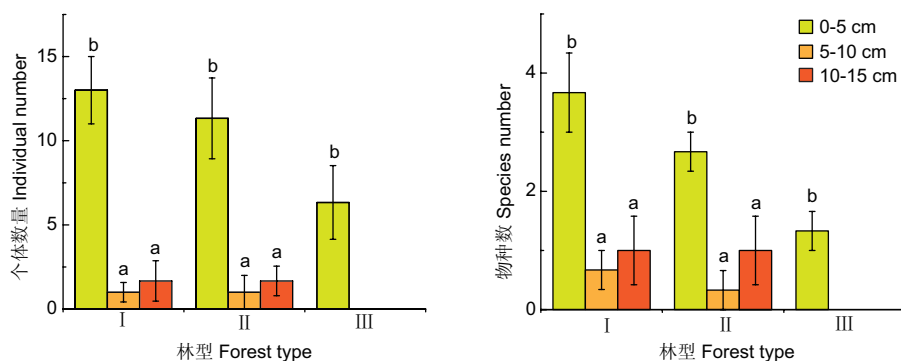


图1 不同森林类型土壤马陆的垂直分布. I: 天然常绿阔叶林; II: 人工常绿阔叶林; III: 人工针阔叶混交林. 图中数据为均值±标准误, $N = 3$. 小写字母代表显著性差异, 相同字母差异不显著, 不同字母差异显著 ($P \leq 0.05$).

Fig. 1 Vertical distribution of soil millipedes in different forest types. I: Natural evergreen broad-leaved forest; II: Artificial evergreen broad-leaved forest; III: Artificial coniferous and broad-leaved mixed forest. Data in the figures are mean $\pm$ SE, $N = 3$. Small letters denote statistical significance; same letters indicate no significant difference, while different letters indicate significant difference ($P \leq 0.05$).

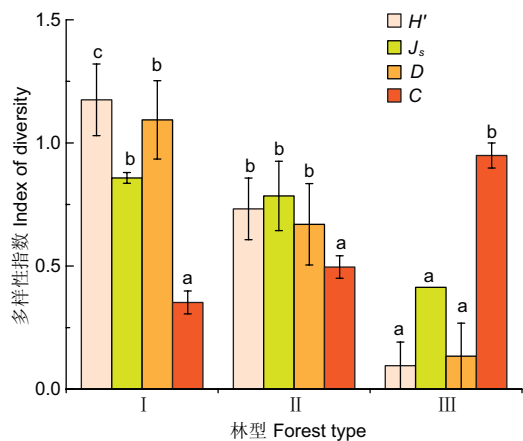


图2 不同林型土壤马陆群落多样性指数。H', Shannon-Wiener多样性指数; J's, Pielou均匀度指数; D, Margalef丰富度指数; C, Simposon优势度指数。I: 天然常绿阔叶林; II: 人工常绿阔叶林; III: 人工针阔叶混交林。图中数据为均值±标准误, N = 3。小写字母代表显著性差异, 相同字母差异不显著, 不同字母差异显著 (P ≤ 0.05)。

Fig. 2 Diversity index of soil millipede community in different forest types. H', Shannon-Wiener diversity index; J's, Pielou evenness index; D, Margalef richness index; C, Simposon dominance index. I: Natural evergreen broad-leaved forest; II: Artificial evergreen broad-leaved forest; III: Artificial coniferous and broad-leaved mixed forest. Data in the figures are mean ± SE, N = 3. Small letters denote statistical significance; same letters indicate no significant difference, while different letters indicate significant difference (P ≤ 0.05).

3 讨论

我国目前共记载倍足纲12目34科406种, 约占世界马陆物种总数的3.7%, 其中四川省物种数量为41种^[23]。对成都市绿地、农用地和人工林等不同生境的调查研究共发现6目6科, 分别为山蛩科、异蛩科、奇马陆科、钩马陆科、生圆马陆科和毛马陆科^[24-25]。此次调查所得马陆属山蛩目和带马陆目, 共

计4科7种。采集的马陆集中分布在0-5 cm土层, 与Loranger-Merciris等研究认为马陆生活在枯枝落叶层或土壤上部几厘米处的结论^[26]一致。

Gowing等对新南威尔士州东南部森林无脊椎动物的体长和体重进行回归分析发现, 线性模型能很好地模拟倍足纲体长-体重的回归关系, 但其体长适用范围仅在11-47 mm^[27]。山蛩科马陆在成都龙泉山城市森林公园分布广泛, 平均体长为54.79 mm, 58.3%的个体体长大于47 mm。对山蛩科体长和体重进行回归分析发现, 线性模型、指数模型虽然都适用, 但从相关系数来看, 体长-体重之间的关系以幂函数模型来模拟为佳。由于采集到的矛带马陆科、奇马陆科和带马陆科马陆数量较少且体型较小, 单个个体生物量难以准确称量, 故没有分析其体长体重间的回归关系。

土壤动物的群落结构和多样性与生境的异质性紧密相关。生境的空间异质性越高, 能够提供的小生境和小气候条件越丰富, 生物多样性越高^[28-30]。有研究发现, 不同生境之间马陆的丰度不同, 且与植物群落结构和树种组成相关^[1, 12]。Slavomír等通过对欧洲桦*Betula pubescens*、欧洲赤松*Pinus sylvestris*、欧洲落叶松*Larix decidua*、欧洲鹅耳枥*Carpinus betulus*、欧洲冷杉*Abies alba*、欧洲云杉*Picea abies*、灰桤木*Alnus incana*、黑杨*Populus nigra*和欧洲白榆*Ulmus laevis*九种纯林的调查发现, 灰桤木、黑杨、欧洲白榆和欧洲鹅耳枥纯林中马陆多样性丰富^[11]。森林冠层郁闭度的降低和木本植物多样性的下降可导致马陆物种丰富度和多样性的下降^[31-32], 这与凋落物的数量和质量有关。马陆物种丰富度在混交林中大于针叶林, 在原生林中大于人工林^[33]。张雪萍等对帽儿山林区的调查发现, 马陆个体数量在阔叶林、针阔叶混交林和针叶林中依次减少^[9]。土壤动物的丰富性和多样性还受到土地利用、农业生产、林业管理和野生动物保护活动的影响^[34-36]。龙泉山城市森林公园天然常绿阔叶林人为干扰少, 原生植被保存相对完好, 植物多样性高, 凋落物数量和种类丰富, 能为马陆提

表2 不同森林类型马陆密度、体长和生物量
Table 2 Millipede density, average length and biomass in different types of forest

科 Family	物种 Species	天然常绿阔叶林 Natural evergreen broad-leaved forest			人工常绿阔叶林 Artificial evergreen broad-leaved forest			人工针阔叶混交林 Artificial needle broad-leaved mixed forest		
		密度 Density (n/ind. m ²)	体长 Body length (l/mm)	生物量 Biomass (m/g m ²)	密度 Density (n/ind. m ²)	体长 Body length (l/mm)	生物量 Biomass (m/g m ²)	密度 Density (n/ind. m ²)	体长 Body length (l/mm)	生物量 Biomass (m/g m ²)
山蛩科 Spirobolidae	1	8.00	64.29		10.67	47.37		8.00	64.11	
矛带马陆科 Doratodesmidae	2	1.33	5.00							
奇马陆科 Paradoxosomatidae	3	5.78	4.42	7.91 ± 2.29a	4.44	4.44	8.53 ± 4.19a			8.47 ± 4.27a
	4	1.78	5.83		0.44	7.03				
	5	2.22	5.20							
带马陆科 Polydesmidae	6	0.89	3.14		3.11	9.75				
	7	0.89	39.42					0.44	4.05	
平均 Average		20.89	25.59		18.67	26.47		8.44	62.72	

表3 山蛩科体长-重量方程参数
Table 3 Length-weight equation parameters for Spirobolidae

类群 Group	数量 Number	体长范围 Length range (l/mm)	模型 Model	a	b	R ²	P
山蛩科 Spirobolidae	60	10-139	L	24.666	-641.080	0.840	0.000
			E	0.047	23.185	0.862	0.000
			P	2.114	0.098	0.914	0.000

L: 线性模型, 体重(干重/mg) = a + b (体长); E: 指数模型, ln体重(干重/mg) = ln a + b (体长); P: 幂函数模型, ln体重(干重/mg) = ln a + b (ln体长)。
L: Linear model; weight (dry mass/mg) = a + b (length). E: Exponential model; ln Weight (dry mass/mg) = ln a + b (length). P: Power model; ln Weight (dry mass/mg) = ln a + b (ln length).

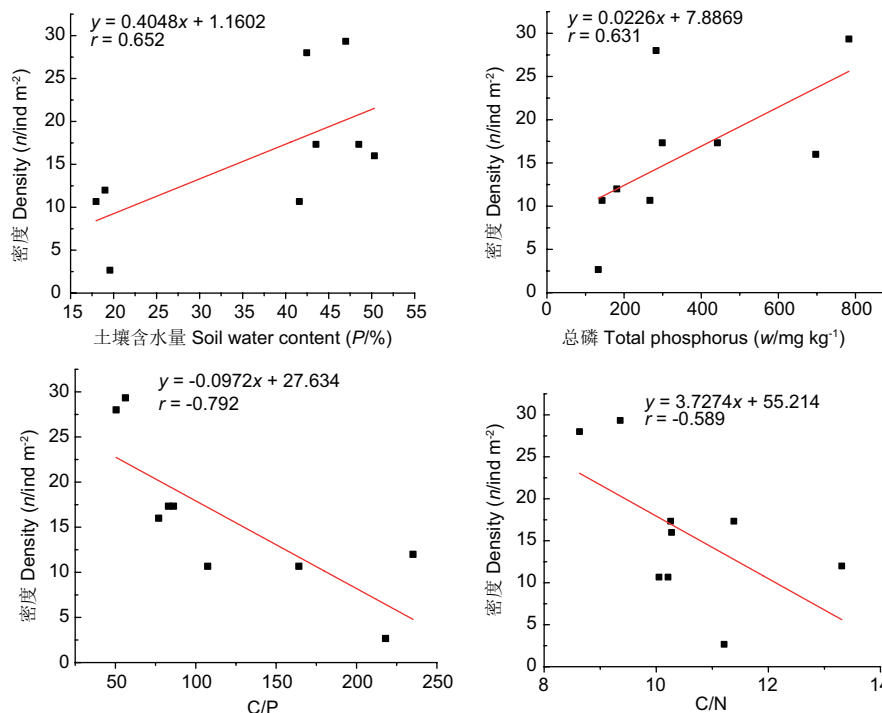


图3 马陆密度与相关土壤因子的线性关系。
Fig. 3 The linear relationships between millipede density and relevant soil factors.

表4 马陆分布与土壤因子相关分析
Table 4 The correlation analysis of millipede distribution and soil factors

林型 Forest type	土壤含水量 Soil water content (P/%)	土壤容重 Bulk density (p/g cm ⁻³)	pH	总氮 Total nitrogen (w/g kg ⁻¹)	总有机碳 Total organic carbon (w/g kg ⁻¹)	C/N	总磷 Total phosphorus (w/mg kg ⁻¹)	全钙 Total calcium (w/g kg ⁻¹)	C/P
I	48.60 ± 0.97c	0.83 ± 0.06a	5.64 ± 0.28b	4.55 ± 0.44b	45.26 ± 4.52b	9.96 ± 0.30a	640.67 ± 102.39b	1.99 ± 0.47b	73.12 ± 8.84a
II	42.52 ± 0.56b	1.11 ± 0.07a	6.47 ± 0.47b	2.21 ± 0.58a	22.59 ± 4.31a	10.08 ± 0.80a	283.00 ± 9.24a	1.24 ± 0.13ab	80.32 ± 16.49a
III	18.84 ± 0.47a	1.03 ± 0.10a	4.52 ± 0.06a	2.71 ± 0.26a	31.71 ± 5.71ab	11.52 ± 0.95a	152.33 ± 14.62a	0.50 ± 0.05a	205.76 ± 21.40b

I: 天然常绿阔叶林; II: 人工常绿阔叶林; III: 人工针阔叶混交林. 图中数据为均值±标准误, n = 3. 小写字母代表显著性差异, 相同字母差异不显著, 不同字母差异显著 (P ≤ 0.05).
I: Natural evergreen broad-leaved forest; II: Artificial evergreen broad-leaved forest; III: Artificial coniferous and broad-leaved mixed forest. Data in the figures are mean ± SE, n=3. Small letters denote statistical significance, same letters indicate no significant difference, while different letters indicate significant difference (P ≤ 0.05).

供多样的栖息环境和食源,因而该林型中马陆群落结构相对复杂,多样性指数高.近十年来人工常绿阔叶林受人为干扰减少、演替良好,植物种类较复杂,地表凋落物丰富,故马陆类群数和个体数较丰富.人工针阔叶混交林立地条件较差,树种相对单一,土壤保温保湿能力较弱,受人类活动影响强烈,马陆的类群数和个体数少,多样性指数低.由于在人工针阔叶混交林中采集到的94.7%的马陆为山蛩科、体型大,而在天然常绿阔叶林和人工常绿阔叶林中采集到不少奇马陆科、带马陆科等小型马陆,故计算平均体长时,人工针阔叶混交林马陆平均体长显著大于天然常绿阔叶林和人工常绿阔叶林.

土壤温度和湿度是影响马陆群落组成的主要非生物因素^[37],我们发现马陆的密度与土壤含水量存在显著相关性,与以往的研究结果一致.土壤磷和马陆群落特征之间有重要关系,这是由于磷是植物和马陆等无脊椎动物最重要的土壤养分之一,枯死植物是马陆食物和磷的重要来源^[38].Stašiov发现,土壤磷是影响斯洛伐克西南部橡树-鹅耳枥混交林中马陆物种丰富度的最重要因素^[39].在龙泉山城市森林公园典型森

林群落中,马陆密度与总磷含量呈显著线性正相关.马陆耐受性较窄,对环境变化能够迅速作出反应,因此可用作监测生态系统健康状况和环境变化的指标,从而对森林生态系统进行可持续管理.

4 结论

龙泉山城市森林公园天然常绿阔叶林马陆数量、密度和多样性大于人工常绿阔叶林和人工针阔叶混交林,马陆生物量在人工常绿阔叶林中最高,其次是人工针阔叶混交林和天然常绿阔叶林.马陆分布特征与森林类型、土壤含水率和总磷含量等环境因子密切相关.该研究可为成都城市森林生态系统马陆多样性的研究提供基础数据,有利于该区生态系统的科学管理.但需要注意的是,季节变化可能会对不同林型间马陆数量和种类有一定的影响,需要进一步研究.

致谢 感谢Olusanya Abiodun Olatunji博士修改英文摘要.

参考文献 [References]

- Mbenoun MPS, Nzoko FAR, Vandenspiegel D, Didier VS, Golovatch SI. Diversity and distribution of millipedes (Diplopoda) in the Campo Ma'an National Park, southern Cameroon [J]. *Afr J Ecol*, 2018, **56** (1): 73-80
- Sierwald P, Bond JE. Current status of the Myriapod class diplopoda (millipedes): taxonomic diversity and phylogeny [J]. *Annu Rev Entomol*, 2007, **52** (52): 401-420
- 王梦茹, 傅声雷, 徐海翔, 王美娜, 时雷雷. 陆地生态系统中马陆的生态功能[J]. 生物多样性, 2018, **26** (10): 1051-1059 [Wang MR, Fu SL, Xu HX, Wang MN, Shi LL. Ecological functions of millipedes in the terrestrial ecosystem [J]. *Biodiv Sci*, 2018, **26** (10): 1051-1059]
- Rawlins AJ, Bull ID, Poirier N, Ineson P, Evershed RP. The biochemical transformation of oak (*Quercus robur*) leaf litter consumed by the pill millipede (*Glomeris marginata*) [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (5): 1063-1076
- Lavelle P, Spain AV. Soil Ecology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001
- Cárcamo HA, Abe TA, Prescott CE, Holl FB, Chanway CP. Influence of millipedes on litter decomposition, N mineralization, and microbial communities in a coastal forest in British Columbia, Canada [J]. *Can J For Res*, 2000, **30** (5): 817-826
- Anderson JM, Bignell DE. Bacteria in the food, gut contents and faeces of the litter-feeding millipede *glomeris marginata* (villers) [J]. *Soil Biol Biochem*, 1980, **12** (3): 251-254
- Blower JG. Millipedes Synopsis of the British Fauna (New Series) [M]. London: The Linnean Society of London, 1985
- 张雪萍, 李春艳, 张思冲. 马陆在森林生态系统物质转化中的功能研究[J]. 生态学报, 2001, **21**: 75-79 [Zhang XP, Li CY, Zhang SC. Study of the function of millipedes in substance decomposition [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21**: 75-79]
- Marek PE, Bond JE. Phylogenetic systematics of the colorful, cyanide-producing millipedes of appalachia (Polydesmida, Xystodesmidae, Apheloriini) using a total evidence Bayesian Approach [J]. *Mol Phy Evol*, 2006, **41**: 704-729
- Stašiov S, Stašiová A, Svitok M, Michalková E, Slobodník B, Lukáčik I. Millipede (Diplopoda) communities in an arboretum: Influence of tree species and soil properties [J]. *Biologia*, 2012, **67** (5): 945-952
- Ashwini KM, Sridhar KR. Seasonal abundance and activity of pill millipedes (*Arthrosphaera magna*) in mixed plantation and semi-evergreen forest of southern India [J]. *Acta Oecol*, 2006, **29** (1): 27-32
- Ashwini KM, Sridhar KR. Distribution of pill millipedes (*Arthrosphaera*) and associated soil fauna in the western Ghats and west coast of India [J]. *Pedosphere*, 2008, **18** (6): 749-757
- 岳士忠, 张慧琦, 黄财德, 乔玉辉. 不同基质及硒添加量对蚯蚓生长、繁殖和富硒能力的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25** (4): 885-891 [Yue SZ, Zhang HQ, Huang CD, Qiao YH. Effects of different culture materials and selenium contents on the growth, reproduction, and tissue selenium enrichment of the earthworm *Eisenia fetida* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (4): 885-891]
- 潘开文, 张林, 邵元虎, 傅声雷. 中国土壤动物多样性监测: 探知土壤中的奥秘[J]. 生物多样性, 2016, **24** (11): 1234-1239 [Pan KW, Zhang L, Shao YH, Fu SL. Thematic monitoring network of soil fauna diversity in China: exploring the mystery of soils [J]. *Biodiv Sci*, 2016, **24** (11): 1234-1239]
- Sun F, Pan K, Li Z, Wang S, Tariq A, Olatunji OA, Sun X, Zhang L, Shi W, Wu X. Soybean supplementation increases the resilience of microbial and nematode communities in soil to extreme rainfall in an agroforestry system [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **626**: 776-784
- Song D, Pan K, Tariq A, Sun F, Zhang L, Sun X, Olatunji OA, Wu X. Large-scale patterns of distribution and diversity of terrestrial nematodes [J]. *Appl Soil Ecol*, 2017, **114**: 161-169
- Bandow C, Coors A, Karau N, Römbke J. Interactive effects of lambda-cyhalothrin, soil moisture, and temperature on *Folsomia candida* and *Sinella curviseta* (Collembola) [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2014, **33** (3): 654-661
- Van Den Hoogen J, Geisen S, Routh D, Ferris H, Traunsperger W, Wardle DA, Bardgett RD. Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale [J]. *Nature*, 2019, **572**: 194-198
- 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Yin WY. Pictorial Keys to Soil Animals of China [M]. Beijing: Science Press, 1998]
- 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992 [Yin WY. Subtropical Soil Animals of China [M]. Beijing: Science Press, 1992]
- Abramoff MD, Magalhães PJ, Ram SJ. Image processing with ImageJ [J]. *Biophoton Int*, 2004, **11** (7): 36-42
- 蒋玄空, 陈会明. 中国倍足纲分类研究进展[J]. 贵州科学, 2018, **36** (5): 56-61 [Jiang XK, Chen HM. Research progress in taxonomy of Diplopoda in China [J]. *Guizhou Sci*, 2018, **36** (5): 56-61]
- 罗嫚丽, 黄婷婷, 肖玖金, 黄进平, 张健, 彭彩云. 城市草坪不同管理方式下土壤动物群落结构特征与差异[J]. 浙江农业学报, 2017, **29** (11): 1835-1843 [Luo ML, Huang TT, Xiao JJ, Huang JP, Zhang J, Peng CY. Characteristics and differences of soil fauna community in different management modes of urban lawn [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2017, **29** (11): 1835-1843]
- 肖玖金, 张利, 李雪菲, 李云, 刘文, 马奉. 柳杉人工林林窗土壤动物群落结构特征[J]. 中国科学院大学学报, 2015, **32** (1): 57-62 [Xiao JJ, Zhang L, Li XF, Li Y, Liu W, Ma F. Soil fauna community diversity in forest gap of *Cryptomeria fortune* artificial stands [J]. *J Univ Chin Acad Sci*, 2015, **32** (1): 57-62]
- Loranger-Merciris G, Imbert D, Bernhard-Reversat F, Lavelle P, Ponge JF. Litter N-content influences soil millipede abundance, species richness and feeding preferences in a semi-evergreen dry forest of Guadeloupe (Lesser Antilles) [J]. *Biol Fertil Soils*, 2008, **45** (1): 93-98
- Gowing G, Recher HF. Length-weight relationships for invertebrates from forests in south-eastern New South Wales [J]. *Aust J Ecol*, 1984, **9** (1): 5-8
- 何振, 赵琴, 李迪强, 李密, 谷志容. 不同生境土壤跳虫及地表节肢动物群落结构和多样性特征[J]. 北京林业大学学报, 2017, **39** (5): 98-

- 108 [He Z, Zhao Q, Li DQ, Li M, Gu ZR. Structure and diversity of soil collembolan and aboveground arthropod communities under different habitats [J]. *J Beijing For Univ*, 2017, **39** (5): 98-108]
- 29 Fischer J, Lindenmayer DB. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2007, **16** (3): 265-280
- 30 Heisswolf A, Reichmann S, Poethke HJ, Schröder B, Obermaier E. Habitat quality matters for the distribution of an endangered leaf beetle and its egg parasitoid in a fragmented landscape [J]. *J Ins Conserv*, 2009, **13** (2): 165-175
- 31 Dangerfield JM. Abundance, biomass and diversity of soil macrofauna in savanna woodland and associated managed habitats [J]. *Pedobiologia*, 1990, **34**: 141-150
- 32 Mwabvu T. Millipedes in small-scale farming systems in Zimbabwe: abundance and diversity (Diplopoda, Spirostreptida) [J]. *Entomolog Scand Suppl*, 1997, **51**: 287-290
- 33 Bonham KJ, Mesibov R, Bashford R. Diversity and abundance of some ground-dwelling invertebrates in plantation vs. native forests in Tasmania, Australia [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **158** (1-3): 237-247
- 34 Laan JJV, Hawkins CP, Olson JR, Hill RA. Linking land use, in-stream stressors, and biological condition to infer causes of regional ecological impairment in streams [J]. *Freshwater Sci*, 2013, **32** (3): 801-820
- 35 欧阳喜辉, 周绪宝, 王宇. 有机农业对土壤固碳和生物多样性的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, **27** (11): 224-230 [Ouyang XH, Zhou XB, Wang Y. Progress in functions of organic agriculture in soil carbon sequestration and biodiversity [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, **27** (11): 224-230]
- 36 周泓杨, 张健, 张丹桔, 张捷, 魏大平, 赵燕波, 赵波, 李川北. 不同郁闭度控制下马尾松(*Pinus massoniana*)人工林土壤动物群落特征[J]. 生态学报, 2017, **37** (6): 1939-1955 [Zhou HY, Zhang J, Zhang DJ, Zhang J, Wei DP, Zhao YB, Zhao B, Li CB. Community characteristics of soil fauna for different canopy density of a *Pinus massoniana* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (6): 1939-1955]
- 37 Sterzyńska M, Tajovský K, Nicia P. Contrasting responses of millipedes and terrestrial isopods to hydrologic regime changes in forested montane wetlands [J]. *Eur J Soil Biol*, 2015, **68**: 33-41
- 38 Stašiov S, Kubovčík V, Čiliak M, Diviaková A, Lukáčik I, Pátoprstý V, Dovciak M. Heterogeneity in millipede communities (Diplopoda) within a forest-forest edge-meadow habitat complex [J]. *Acta Oecol*, 2019, **98**: 6-13
- 39 Stašlov S. Millipede (Diplopoda) communities in mixed oak-hornbeam forest stands-effect of selected site factors [J]. *Pol J Ecol*, 2009, **57** (4): 785-792