长白山杨桦林不同蚯蚓类群对电击采样的响应及其影响因素

申智锋 于彬彬 李素莉 刘 舒 朱丹丹 傅声雷 张卫信*
(河南大学环境与规划学院, 河南开封 475004)

摘 要 电击法采集蚯蚓对环境相对友好,但电击效率可能因立地条件和蚯蚓类群而变化,进而限制了电击法的广泛应用。本研究于2017年11月上旬采用电击法配合手拣法对长白山3个不同森林发育阶段的杨桦林的蚯蚓群落进行了调查,分析了森林发育阶段、蚯蚓生态型、蚯蚓种群大小以及发育阶段、土壤温湿度状况等对电击效率的影响。结果表明:不同森林发育阶段蚯蚓的电击效率不同,其中40年生杨桦林电击效率最高,其蚯蚓数量和生物量电击效率分别为68.5%和57.4%;表栖型的诺登爱胜蚓(*Eisenia nordenskioldi*)活动能力最强,电击效率高达100%;内-深栖型的长白山杜拉蚓(*Drawida changbaishanensis*)在实验期间处于蜷曲休眠状态,电击效率低至0;而内栖型的安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)的电击效率为22.2%~58.3%;安德爱胜蚓种群大小与电击效率无明显的相关关系(其中,数量:$r=0.139$, $P=0.381$,生物量:$r=0.025$, $P=0.877$);安德爱胜蚓成体的电击效率显著高于幼体($P=0.014$);土壤温度对电击效率有显著的影响,当土壤温度低于6 ℃时电击效率为0;当土壤温度为6~10 ℃时,电击效率为34.6%±13.1%,当土壤温度大于10 ℃时,电击效率为46.0%±8.7%;土壤湿度对电击效率无显著影响。总的来说,电击效率与蚯蚓活动能力的强弱有关。蚯蚓生态型、个体发育阶段及土壤温度在一定程度上影响了蚯蚓的活动能力,进而影响蚯蚓的电击效率。因此,可以根据不同蚯蚓类群活动能力的不同,利用电击法选择性地控制野外蚯蚓群落结构,以开展不同蚯蚓类群生态功能的长期实验研究。

关键词 蚯蚓群落;蚯蚓生态型;采样方法;电击法;群落结构

Responses and the influencing factors of different earthworm groups to electroshocking sampling in poplar-birch forests in Changbai Mountains.

SHEN Zhi-feng, YU Bin-bin, LI Su-li, LIU Shu, ZHU Dan-dan, FU Sheng-lei, ZHANG Wei-xin* (*College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng*, 475004, *Henan, China*).

Abstract: Electroshocking is an environment-friendly approach for earthworm sampling. However, the application of this approach is limited by the varied efficiency of electroshocking across stand conditions and earthworm community composition. In early November of 2017, we investigated earthworm community composition in the poplar-birch forests at three different developmental stages in Changbai Mountains using electroshocking and hand-sorting extraction. We examined the effects of potential factors, such as forest developmental stage, ecological group, population size, life stage of earthworms, soil temperature, and soil moisture on electroshocking efficiency. The electroshocking efficiency of earthworm varied across different stages of forest development. The electroshocking efficiency of earthworms was the highest in the 40-year-old poplar-birch forest, being 68.5% and 57.4% for earthworm number and biomass, respectively. *Eisenia nordenskioldi*, an epigeic species, was most active and had an electroshocking efficiency of 100%. In contrast, *Drawida changbaishanensis*, an endo-anecic species, was dormant during the experiment, with electroshocking efficiency down to 0. The electroshocking efficiency of the slow endogeic spe-

国家自然科学基金项目(41877054和31570516)和国家科技基础资源调查专项课题(2018FY100306)资助。
收稿日期: 2019-12-12 接受日期: 2020-04-10
*通讯作者 E-mail: weixinzhang@vip.henu.edu.cn

cies *Eisenia andrei* ranged from 22.2% to 58.3%. There was no significant correlation between *Eisenia andrei* population size and electroshocking efficiency for both the number ($r=0.139$, $P=0.381$) and the biomass ($r=0.025$, $P=0.877$). The electroshocking efficiency of adults of *Eisenia andrei* was significantly higher than that of juveniles ($P=0.014$). Soil temperature had a significant effect on the electroshocking efficiency, with the value being 0 when soil temperature <6 ℃, 34.6%±13.1% when soil temperature 6–10 ℃, and 46.0%±8.7% when soil temperature >10 ℃. Soil moisture did not affect electroshocking efficiency of earthworms. Overall, the electroshocking efficiency was closely related to the activity of earthworms. Earthworm ecological group, life stage, and soil temperature affected earthworm activity, and consequently changed the electroshocking efficiency of earthworms. Due to different sensitivity of earthworms to electroshocking, long-term experimental study on the ecological functions of different earthworm groups can be performed through different manipulations of earthworm community structure using the electroshocking approach.

Key words: earthworm community; earthworm ecological group; sampling method; electroshocking; community structure.

蚯蚓属于大型的土壤动物,对陆地生态系统碳及养分循环有重要的调节作用(Blair *et al.*,1997;张卫信等,2007;曹四平等,2018),被称为“生态系统工程师”(Bartlett *et al.*,2010;De Wandeler *et al.*,2016)。截至目前,中国已记录 9 科 28 属 640 种(蒋际宝等,2018)。依据蚯蚓的习性及其生境可以将蚯蚓分为 3 种生态类群,即表栖型(epigeic)、内栖型(endogeic)和深栖型(anecic)(Edwards *et al.*,1996;Roembke *et al.*,2005)。不同生态类群的蚯蚓,其食性以及对水热等环境变化的响应策略差异很大,故其在土壤中的主要活动场所及活动能力迥异(Edwards *et al.*,1996;姚波等,2018)。因为土壤的“黑箱”作用以及蚯蚓的聚集分布行为(Karaca,2011),想要全面准确地评估一个地区蚯蚓的群落特征并不容易。蚯蚓的采样方法有很多,最常见的是挖掘手拣法,早在 1969 年,Bouche 就提出手拣法很难获取深栖型蚯蚓,其有效采样深度范围多局限于 20 cm 或 30 cm 深的土层(Gunn,1992)。同时,在禁止采挖的地区,因为手拣法会破坏土壤结构,通常不被接受(Bartlett *et al.*,2006)。在石头较多、根系较为稠密的地区,手拣法很难有效实施(龚鹏博等,2010)。更重要的是,它比较费时费力(Callaham *et al.*,1997;范如芹等,2010),故并不适合于大范围的采样。另一类蚯蚓采样方法是化学驱离法,分为非环境友好型和环境友好型两类。常用的非环境友好型的化学驱离法有福尔马林法(Raw,1959)、高锰酸钾法(Evans *et al.*,1947)及清洁剂法(East *et al.*,1998)等,它们对蚯蚓和其他生物均可能会造成较大危害(Gunn,1992)。环境友好型驱赶法主要有芥末法(Chan *et al.*,2001)、异硫氰酸烯丙酯(Allyl isothiocyanate)法(Borek *et al.*,1995)、洋葱法(Steffen *et al.*,2013)等。但是,这些方法与其他化学驱离法面临同样的困境,即在饱和或者近饱和的土壤中下渗速率很低,即使向下移动也会不断被土壤中的水稀释,从而导致采样效率的降低(Pelosi *et al.*,2009)。因为类似的原因,化学驱离法也不适于在坡度较大的地区采样(Schmidt,2001)。而且化学驱离法对横向作穴的蚯蚓效果较差,同时它对土壤温湿度有一定要求。当土壤温度低于 4~8 ℃、土壤过湿或者过干时,其采样效率均较差(Robertson *et al.*,1999)。而且,对于过干的土壤,化学驱离法对蚯蚓的采样效率并不会因为事先添加水而提高(Eisenhauer *et al.*,2008)。最重要的是,化学驱离法会给采样区带入新的物质,可能不同程度地影响采样区原有的生物;如此,对于野外长期试验样地来讲,完全不可行。电击法在 20 世纪 50 年代就已经被用于蚯蚓采样,但是直到 21 世纪才开始被运用于野外蚯蚓的控制试验(Thielemann,1986;Staddon *et al.*,2003)。研究表明电击法对线虫、线蚓、跳虫、微小节肢动物以及植物均没有不利影响,而且所获得的蚯蚓种类与采用手拣法发现的物种大致相似(Bohlen *et al.*,1995)。电击法可以作为一个长期大规模蚯蚓剔除的方法,已被成功用于研究蚯蚓对土壤 C、N 循环等的贡献(Bohlen *et al.*,1995;Bohlen *et al.*,1997;Zou *et al.*,2002)。

本文在长白山地区开展了电击法和手拣法的对比研究,以探究长白山地区不同蚯蚓类群对电击法的响应及其可能的影响因素,为制定有效的野外蚯

蚓采样和群落结构控制方案提供基础科学数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省中国科学院长白山森林生态系统定位研究站(127°40′E—128°16′E,41°35′N—42°25′N)内的 20 年、40 年和 80 年林龄的杨桦林。该地区属于温带大陆性山地气候,特点冬季漫长而寒冷、夏季凉爽而潮湿,1 月平均气温为-17 ℃,7 月平均气温在 17.5 ℃,年平均气温约 3 ℃,年降水量在 750 mm 左右,集中在夏季,海拔约为 730 m,土壤类型主要是暗棕壤(陈伟等, 2019; 赵学鹏等, 2018)。

杨桦林是东北地区森林的先锋群落,其主要优势树种为白桦(*Populus davidiana*)和山杨(*Betula platyphylla*),还少量其他树种如:蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)等,灌草植被主要是刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等(张春雨等,2009;岳琳艳等,2015)。

1.2 样品采集与测定

2017 年 11 月对长白山 3 个不同森林发育阶段的杨桦林进行采样。在每一个发育阶段的森林中选 3 片不同的林地,于每片林地内设置 9 个小样方(30 cm×30 cm×30 cm),每个小样方之间相距约 5 m,共计 81 个小样方。

蚯蚓的采集采用电击法配合手拣法,选点采用随机布点的方法,即将一个 30 cm×30 cm 的铁框随机抛出选点,拨开地面凋落物后用便携式温湿度仪(顺科达 TR-6,产地:中国,精确度:温度±0.3 ℃;湿度(体积含水率)±2%)对土壤温度和湿度进行测定,为了减少土壤温度和湿度的异质性,在每个小样方随机测五次,并记录下来,求取所获得温度和湿度的平均土壤温度和湿度作为该样方的最终的温湿度以减少异质性。然后将电击仪(型号:H-16800W,电容:2 个 200 uf 电容,锂电池电压:DC12V,产生的交流电功率:1800 W,产地:中国中山)两个电极插入土壤(30 cm),两电极相距 30 cm,为了确保试验的严谨性我们设定每个样方电击时间为 10 min,电击完成后等待时间约为 2 min,以便观察是否还有受电击影响但尚未爬出的蚯蚓(本次采样电击结束后爬出的蚯蚓数量为 0)。等待时间结束后用洞锹将整个小样方的土块挖出,收集土壤中残留蚯蚓。蚯蚓直接暂存于装有 75%的酒精的离心管,带回实验室后清洗、记数、称重,保存于 95%的酒精中以备进一步的分类鉴定,蚯蚓鉴定主要借鉴《中国陆栖蚯蚓》(徐芹等,2011)。在本次采样过程中扒开凋落物后并未发现地表有蚯蚓。电击效率计算见公式。

$$A(\%)=\frac{B}{B+C}\times 100$$

式中,A 表示蚯蚓电击效率,B 表示电击得到的蚯蚓数量或生物量,C 表示电击后挖掘样方所得的蚯蚓数量或生物量。

1.3 数据分析

对不同森林发育阶段杨桦林中蚯蚓群落及代表性蚯蚓种类的数量和生物量、不同森林发育阶段蚯蚓电击效率、土壤温度和湿度分区间对蚯蚓电击效率进行单因素方差分析、蚯蚓生态型下所得的蚯蚓电击效率进行双因素方差分析;对安德爱胜蚓的种群大小、年龄结构以及其栖息地土壤温湿度与其电击效率分别进行相关分析,对电击法和手拣法获取的安德爱胜蚓成体和幼体采用卡方分析。所有数据处理和统计均用 SPSS 20 完成,用 SigmaPlot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 杨桦林不同蚯蚓的分布层次和深度

在长白山杨桦林中,共发现两科两属三种,即正蚓科爱胜蚓属的诺登爱胜蚓(*Eisenia nordenskioldi*)和安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)以及链胃蚓科杜拉蚓属的长白山杜拉蚓(*Drawida changbaishanensis*),其中诺登爱胜蚓仅在 40 年次生杨桦林中发现(表 1)。从生态型角度来看,诺登爱胜蚓属于表栖型蚯蚓,安德爱胜蚓属于内栖型蚯蚓,长白山杜拉蚓属于内-深栖型蚯蚓。采样中我们发现诺登爱胜蚓主要分布在土壤表层腐殖质中,安德爱胜蚓主要分布在 0~20 cm土层中,长白山杜拉蚓分布于 10~20 cm 土层中。

2.2 不同森林发育阶段蚯蚓的电击效率

从蚯蚓数量的变化来看(图 1),40 年林龄样地电击效率显著高于 20 年和 80 年林龄样地。从蚯蚓生物量的变化看(图 1),40 年林龄的电击效率显著高于 80 年林龄样地。20 年和 80 年林龄的杨桦林无论是蚯蚓数量还是生物量的电击效率均无显著影响。

表 1 长白山不同发育阶段杨桦林蚯蚓群落组成和生物量变化

Table 1 Characteristics of earthworm community composition and biomass in poplar-birch forests at different developmental stages in Changbai Mountains

	树龄 Stand age (a)	蚯蚓群落 Earthworm community			安德爱胜蚓 *Eisenia andrei*			长白山杜拉蚓 *Drawida changbaishanensis*			诺登爱胜蚓 *Eisenia nordenskioldi*		
		幼体 Juvenile	成体 Adult	合计 Total	幼体 Juvenile	成体 Adult	合计 Total	幼体 Juvenile	成体 Adult	合计 Total	幼体 Juvenile	成体 Adult	合计 Total
数量 ($ind \cdot m^{-2}$)	20	0.82± 0.41 a	2.06± 0.41 b	2.88± 0.82 b	0.82± 0.41 a	1.23± 0.71 b	2.06± 1.09 b	0±0 a	0.82± 0.41 a	0.82± 0.41 a	0±0 a	0±0 a	0±0 a
Number	40	62.96± 25.73 a	19.75± 5.38 a	81.89± 27.35 a	11.93± 1.48 a	9.05± 0.82 a	20.58± 0.41 a	1.65± 1.09 a	2.06± 1.09 a	3.29± 1.79 a	49.38± 24.66 a	8.64± 4.67 a	58.02± 29.28 a
	80	11.93± 4.36 a	6.17± 1.43 ab	18.11± 5.40 ab	9.88± 4.99 a	4.11± 0.82 b	13.99± 5.72 b	2.06± 1.09 a	2.06± 0.82 a	4.11± 1.79 a	0±0 a	0±0 a	0±0 a
生物量 ($g \cdot m^{-2}$)	20	0.07± 0.04 b	1.30± 0.10 b	1.36± 0.10 b	0.07± 0.04 a	0.65± 0.34 b	0.72± 0.36 b	0±0 a	0.65± 0.44 a	0.65± 0.44 a	0±0 a	0±0 a	0±0 a
Biomass	40	3.47± 0.65 a	5.74± 1.18 a	8.56± 0.45 a	1.64± 0.48 a	3.49± 0.22 a	4.86± 0.33 a	0.45± 0.35 a	1.70± 0.91 a	1.76± 0.92 a	1.37± 0.68 a	0.56± 0.30 a	1.93± 0.96 a
	80	1.93± 0.43 ab	2.64± 0.92 ab	4.56± 1.26 ab	1.35± 0.65 a	1.33± 0.41 b	2.69± 1.06 ab	0.57± 0.30 a	1.30± 0.74 a	1.88± 0.93 a	0±0 a	0±0 a	0±0 a

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level.

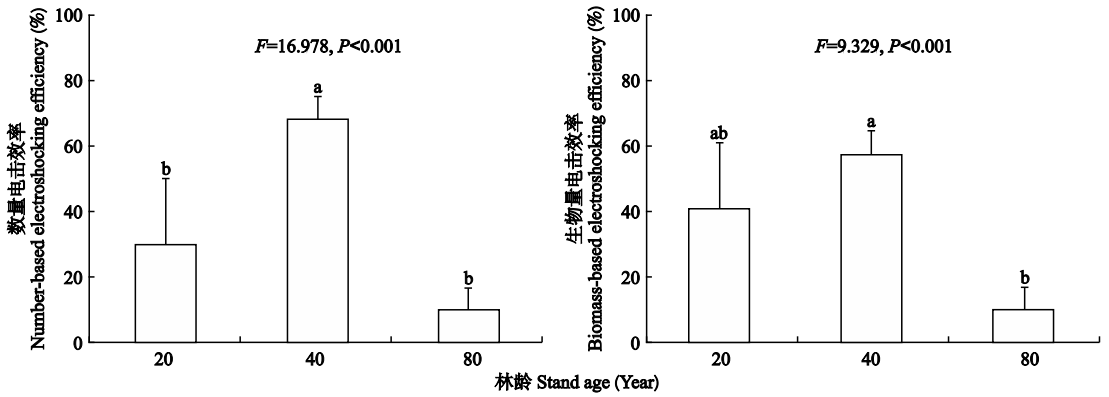


图 1 蚯蚓数量和生物量电击效率随杨桦林发育阶段的对变化

Fig.1 Changes in earthworm electroshocking efficiency based on earthworm number and biomass at different developmental stages of poplar-birch forests

注: 不同字母表示不同林龄间电击效率差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicated that there were significant differences in the efficiency of electroshocking among different stand ages ($P<0.05$).

2.3 不同林龄不同蚯蚓生态型对蚯蚓电击效率的影响

从蚯蚓数量的变化来看(图 2),蚯蚓生态型对蚯蚓电击效率有明显影响($F=24.45, P<0.001$)。其中,表栖型的诺登爱胜蚓电击效率高达到 100%,内栖型的安德爱胜蚓电击效率在 22.22%~58.34%,内-深栖型的长白山杜拉蚓电击效率为 0。而林龄对蚯蚓电击效率并无显著影响($F=1.35, P=0.3$),其与蚯蚓生态型对蚯蚓电击效率也无显著的交互作用($F=1.35, P=0.3$)。

从蚯蚓生物量的变化看(图 2),蚯蚓生态型对蚯蚓电击效率同样有显著影响($F=14.258, P=0.001$)。表栖型的诺登爱胜蚓的电击效率高达 100%,内栖型的安德爱胜蚓的电击效率在 28.47%~66.62%,内-深栖型的长白山杜拉蚓的电击效率为 0。林龄对蚯蚓电击效率同样没有显著影响($F=0.73, P=0.506$),其与蚯蚓生态型对蚯蚓电击效率也无显著的交互作用($F=0.76, P=0.506$)。

2.4 蚯蚓种群大小对蚯蚓电击效率的影响

安德爱胜蚓的电击效率与其基于数量的种群密度没有显著的相关关系($r=0.139$, $P=0.381$)(图 3),与其基于生物量的种群密度也没有显著的相关关系($r=0.025, P=0.877$)(图 3),表明电击效率与内栖型安德爱胜蚓的种群大小关系不大。

2.5 安德爱胜蚓发育阶段对蚯蚓电击效率的影响

不管是基于蚯蚓数量(图 4)还是生物量的变化(图 4),安德爱胜蚓成体的电击效率均高于与幼体的电击效率。对安德爱胜蚓成体和幼体电击和挖掘获得的数量进行卡方分析,结果:$\chi^2=5.984, df=1$,双侧检验$P=0.014$即安德爱胜蚓的电击效率成体

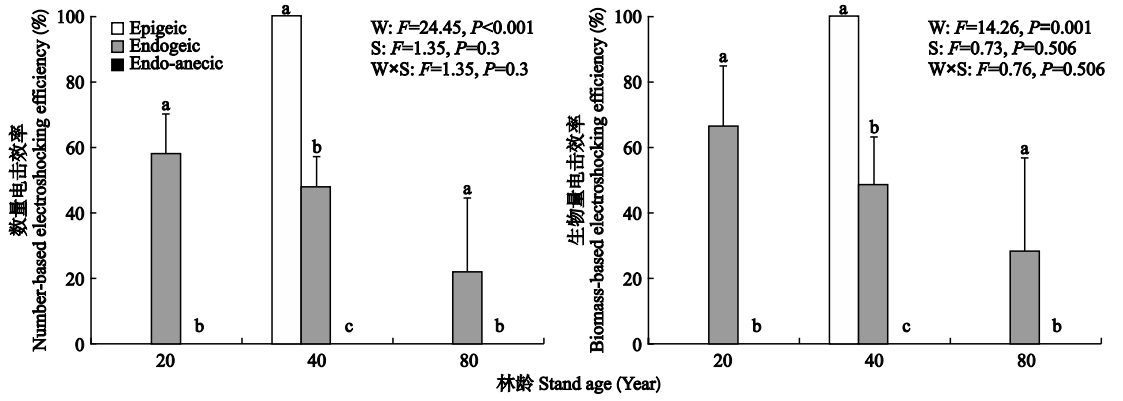


图 2 不同发育阶段的杨桦林中蚯蚓生态型对蚯蚓数量和生物量电击效率的影响

Fig.2 Effects of ecological group on the earthworm electroshocking efficiency based on number and biomass in poplar-birch forests at different developmental stages

注：W 为蚯蚓生态型，S 为林龄。不同字母表示同一林龄样地不同生态型蚯蚓电击效率差异显著（$P<0.05$）。

Note: W and S refers to earthworm ecological group and stand age, respectively. Different letters indicated that the electroshocking efficiency of earthworms belonging to different ecological groups in forests with same stand age was significantly different ($P<0.05$).

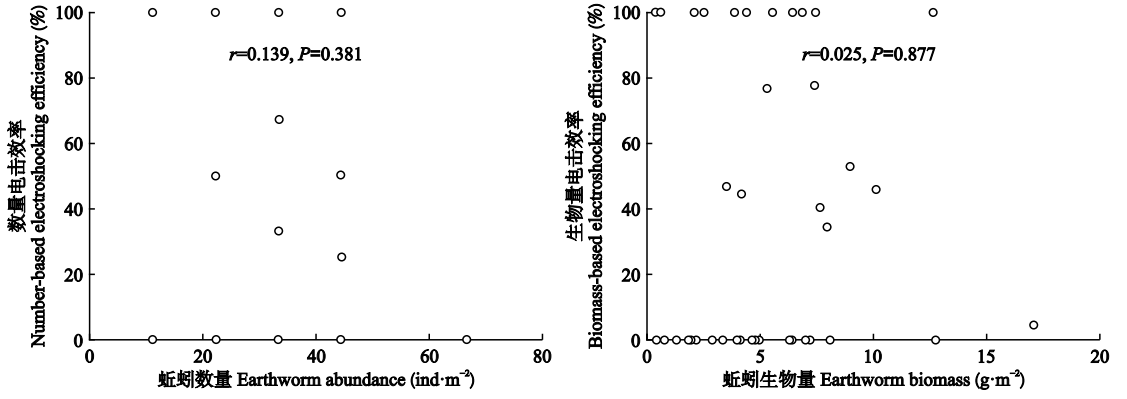


图 3 安德爱胜蚓种群大小对基于蚯蚓数量和生物量的电击效率的影响

Fig.3 The effects of population size of *Eisenia andrei* on the electroshocking efficiency based on earthworm number and biomass

高于幼体。

2.6 土壤温度和湿度对蚯蚓电击效率的影响

从安德爱胜蚓的数量变化看（图 5a），土壤温度与蚯蚓电击效率没有显著的相关关系（$r = 0.03$，$P=0.849$）。控制土壤湿度后的偏相关分析结果仍表明，土壤温度与电击效率依然没有明显关系（$r=0.03$，$P=0.85$）。但是从图中我们发现当温度小于 6 ℃时电击效率始终为 0。

从安德爱胜蚓的生物量变化看（图 5b），土壤温度与蚯蚓电击效率没有明显相关关系（$r=0.01$，$P=0.951$）。控制土壤湿度后的偏相关分析结果也表明，土壤温度与蚯蚓生物量的电击效率没有明显相关关系（$r=0.009$，$P=0.956$）。

从安德爱胜蚓数量的变化看（图 5c），土壤湿度与蚯蚓电击效率没有明显相关关系（$r=0.007$，$P=0.966$）。控制温度后的偏相关分析结果也表明，土壤湿度与蚯蚓数量的电击效率没有明显相关关系（$r=0.007$，$P=0.964$）。

从安德爱胜蚓生物量的变化看（图5d），土壤

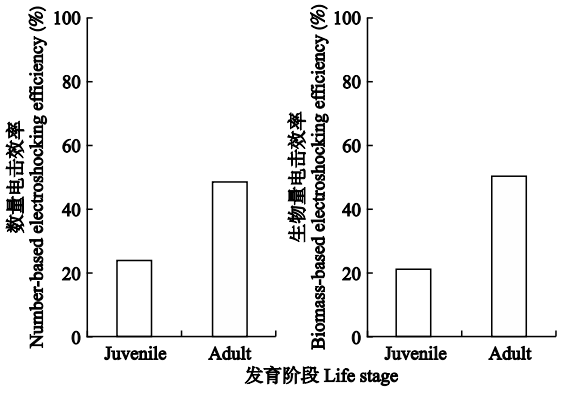


图 4 安德爱胜蚓不同个体发育阶段对蚯蚓数量和生物量电击效率的影响

Fig.4 Effects of life stages on electroshocking efficiency based on the number and biomass of *Eisenia andrei*

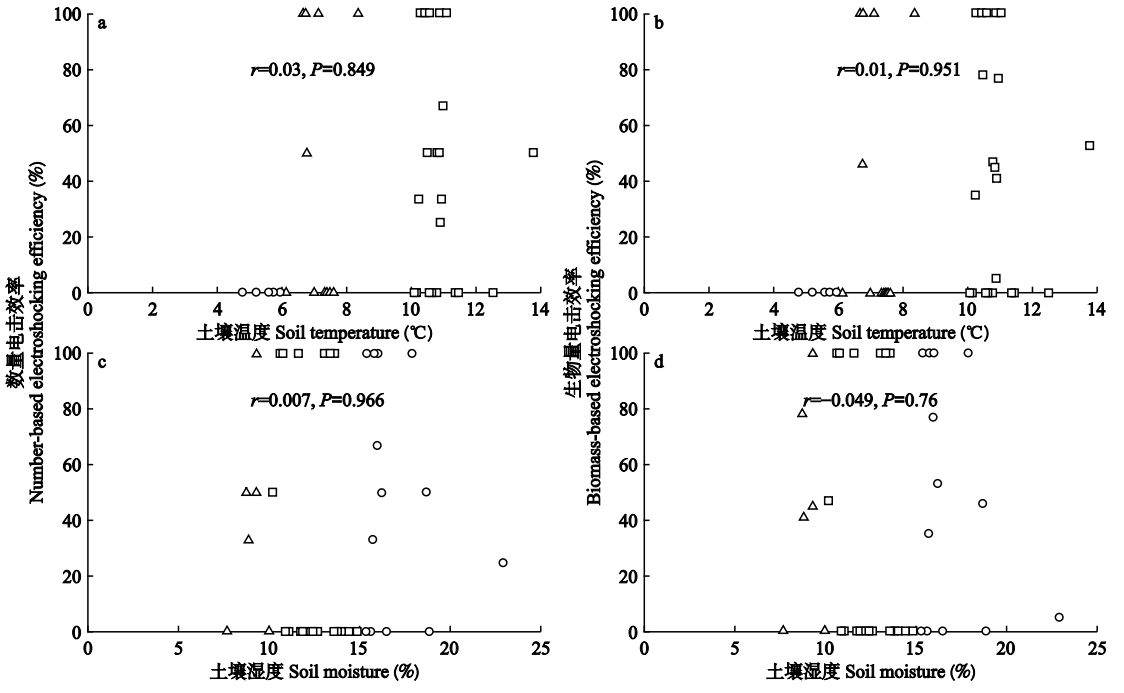


图 5 土壤温度(a、b)和湿度(c、d)对安德爱胜蚓数量和生物量电击效率的影响
Fig.5 Effects of soil temperature (a, b) and moisture (c, d) on the number and biomass-based electroshocking efficiency of *Eisenia andrei*

湿度与蚯蚓电击效率没有明显相关关系(r = −0.049, P = 0.76)。控制温度后的偏相关分析结果也表明,土壤湿度与蚯蚓生物量电击效率没有明显的相关关系(r = −0.048, P = 0.764)。

从图 6a 和图 6b 看,蚯蚓电击效率随着土壤温度区间的升高而升高,温度大于10 ℃时电击效率

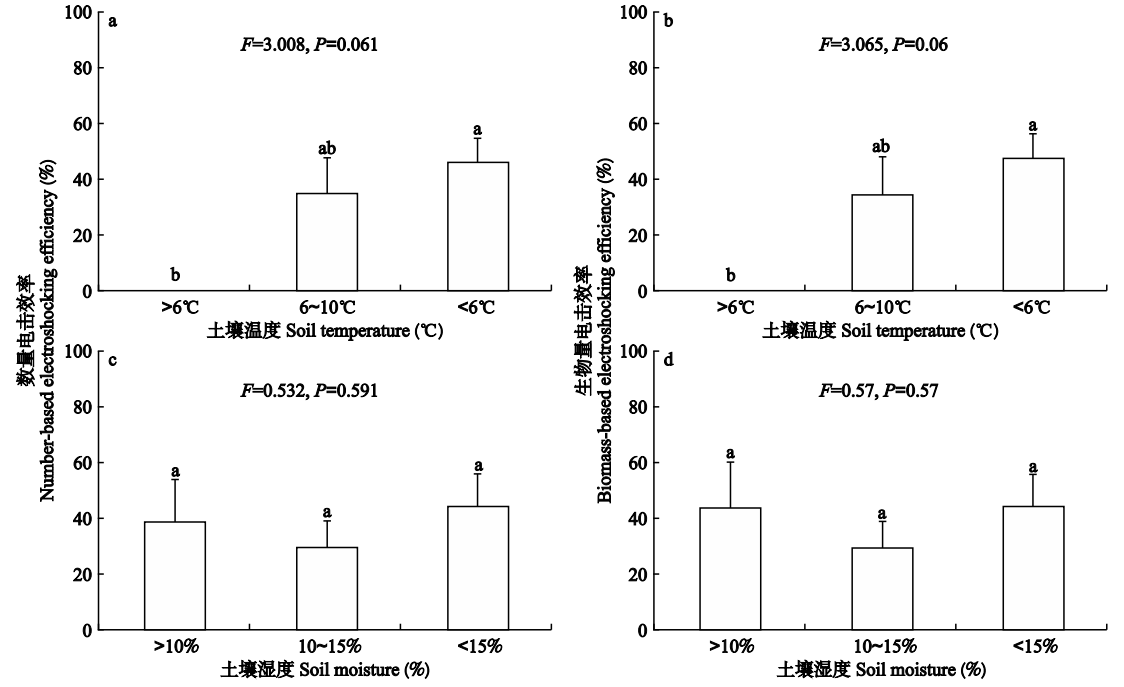


图 6 不同土壤温度区间(a、b)和土壤湿度区间(c、d)对安德爱胜蚓数量和生物量电击效率的差异
Fig.6 The differences of electroshocking efficiency based on the number and biomass of *Eisenia andrei* between different soil temperature intervls (a, b) and between different soil moisture intervis (c, d)
注:不同字母表示不同土壤温度区间(a、b)或湿度区间(c、d)蚯蚓电击效率差异显著(P<0.05)。
Note: Different letters indicated that there was significant difference in electroshocking efficiency between different soil temperature interval (a, b) or between different soil moisture interval (c, d) (P<0.05).

显著高于温度小于 6 ℃时的电击效率($P < 0.001$),温度小于 6 ℃时电击效率始终为 0。

从图 6c 和图 6d 看,土壤湿度对蚯蚓电击效率并无显著影响(其中电击效率数量为 $P = 0.591$;电击效率生物量为 $P = 0.57$)。

3 讨 论

在长白山,表栖型的诺登爱胜蚓主要活动在地表凋落物下面的腐殖质层中,其活动能力较强,电击时,其快速爬出地表,电击法可以有效的反映其种群大小;在 11 月时内深栖型的长白山杜拉蚓已经进入休眠期,在采样的过程发现其身体处于蜷曲状态(图 7),其活动能力低下,这可能是其电击效率为 0 的原因。内栖型的安德爱胜蚓的活动能力介于两者中间,其电击效率同样处于中间水平。表明电击效率的高低与蚯蚓的活动能力可能有很大关系。Daniel(1992)研究也表明,当蚯蚓已经冬眠时采样无法达到其预期的效果。可见,当蚯蚓进入休眠时很难通过电击法采样,而当蚯蚓处于活动状态时电击法效果却很好;电击法采样依赖于高的蚯蚓活动能力(Schmidt,2001)。40 年杨桦林的电击效率整体高于 20 年和 80 年杨桦林,与 40 年杨桦林中表栖型诺登爱胜蚓高的数量和生物量以及诺登爱胜蚓高的电击效率有关。

成体蚯蚓比幼体蚯蚓能更快的爬出地表,可能与其活动能力有关,成体蚯蚓的活动能力高于幼体,所以成体的采样效率高于幼体(Gutierrez-Lopez *et al.*,2016)。由此,80 年杨桦林中安德爱胜蚓的电击效率低于20年和40年杨桦林可能与80年杨桦林安德爱胜蚓幼体数量多于成体有一定关系。

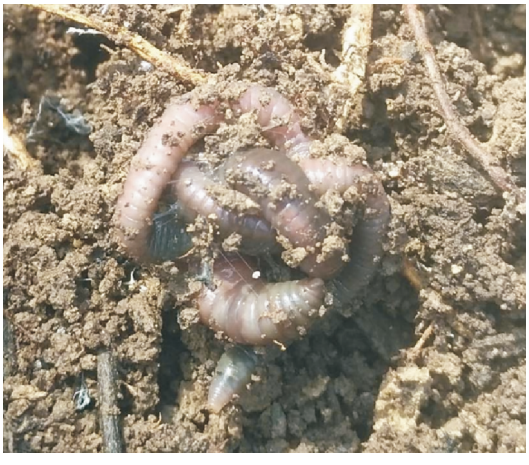


图 7 冬眠的长白山杜拉蚓

Fig.7 Dormancy of *Drawida changbaishanensis*

土壤温度与长白山地区蚯蚓电击效率有一定的关系。当土壤温度低于 6 ℃时,蚯蚓电击效率剧减,这可能与此时蚯蚓活动能力明显下降有关。Schmidt(2001)研究也表明,电击法有效时的最低温度在 6~10 ℃之间。Thielemann(1986)研究同样指出,电击法有效时的最低温度为 6 ℃。蚯蚓对低温敏感,在低温条件下,土壤动物的活动一般会大幅下降(颜绍馗等,2009)。我们的研究结果与此有相似之处,当温度低于 6 ℃时电击法并不能更好的发挥作用,温度在 6~10 ℃时,电击效率低于温度在 10 ℃以上时的电击效率。

本研究中没有发现土壤湿度与蚯蚓电击效率的关联,这与 Schmidt(2001)和 Staddon 等(2003)认为的电击法会受到土壤湿度的影响的研究结果并不一致。可能是与长白山杨桦林土壤湿度有关(表 2),3 个不同林龄的杨桦林中土壤湿度差别较小,故未成为蚯蚓电击效率的限制因子。

由此,电击法的电击效率取决于蚯蚓的活动能力。在长白山采用电击法评估蚯蚓群落可能需要选择温度适宜的季节,即蚯蚓活动能力强的时候。同时,可以通过不同生态型蚯蚓对电击法的不同响应,开展不同生态类群蚯蚓功能的长期定位研究工作。

影响电击法电击效率的因素有很多,主要包括:蚯蚓的种类组成以及蚯蚓的活动状况、土壤条件(温度、湿度、质地、结构、导电率、电极插入深度、电击与土壤的接触距离)、采样过程(持续时间、电压、转换频率)、电击仪自身的硬件配置(输出电压、电击频率、电池容量)等(Singh *et al.*,2016)。同时,电击法与土壤含水量及土壤 pH 值有关,土壤导电系数取决于土壤含水量,在 pH 值低的土壤中效果往往比在 pH 值高的土壤中好(黄福珍,1982)。本文主要以涉及到的蚯蚓种类、生态型、个体发育阶段及

表 2 长白山不同发育阶段杨桦林土壤温度和土壤湿度

Table 2 Soil temperature and moisture of poplar-birch forests at different developmental stages in Changbai Mountains

林龄 Stand age(a)	土壤温度(℃) Soil temperature	ANOVA	土壤湿度(%) Soil moisture	ANOVA
20	6.68±0.21 b	$F = 100.4$,	13.86±0.73 a	$F = 1.742$,
40	9.88±0.20 a	$P < 0.001$	14.30±0.71 a	$P = 0.182$
80	6.40±0.16 b		12.65±0.47 a	

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level.

其活动能力和可能影响到蚯蚓活动能力的土壤温湿度进行探讨,而涉及到采样过程、电击仪自身的硬件配置以及土壤导电率等因素还需要深入研究。

4 结 论

20 年生杨桦林和 80 年生杨桦林蚯蚓电击效率低于 40 年生杨桦林。电击法的效率受蚯蚓活动能力影响较大,同时与蚯蚓自身的生态型以及发育阶段有关。当蚯蚓活动能力强的时候,蚯蚓的电击效率高,而当蚯蚓处于不活动状态时,使用电击法采样并不能达到预期效果。长白山杨桦林中,土壤温度低于 6 ℃后,对低温敏感的蚯蚓种类的活动能力迅速下降,其电击效率趋于零。所以,可以根据不同蚯蚓类群活动能力的不同,利用电击法选择性地降低对电击敏感的蚯蚓的种群大小,以开展不同蚯蚓类群生态功能的长期实验研究。

致谢 感谢长白山自然保护管理中心董时杰、祖维忠、孙宏起、李永鹏等老师为野外采样提供的大力支持,感谢廊坊师范学院张玉峰老师在的鉴定工作上的帮助,感谢河南大学环境与规划学院崔洋、李君勇两位老师在样品采样的帮助。

参考文献

曹四平, 谭 灿, 王 欢, 等. 2018. 南泥湾湿地陆栖蚯蚓的分布及其影响因素. 干旱区资源与环境, **32**(4): 80-84. [Cao SP, Tan C, Wang H, *et al*. 2018. Distribution of terrestrial earthworms and its influencing factors in the Nanniwan wetland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, **32**(4): 80-84.]

陈 伟, 冯 月, 张军辉, 等. 2019. 阔叶红松林土壤木质素稳定性对氮添加和降水减少的响应. 生态学杂志, **38**(10): 3007-3014. [Chen W, Feng Y, Zhang JH, *et al*. 2019. Response of soil lignin stability to nitrogen addition and precipitation reduction in broad-leaved Korean pine forest. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(10): 3007-3014.]

范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等. 2010. 蚯蚓野外采样方法评述. 应用生态学报, **21**(6): 242-248. [Fan RQ, Zhang XP, Liang AZ, *et al*. 2010. Field sampling methods for earthworm: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **21**(6): 242-248.].

龚鹏博, 李健雄, 廖崇惠, 等. 2010. 茶枯溶液在蚯蚓采样中的应用. 四川动物, **29**(3): 401-406. [Gong PB, Li JX, Liao CH, *et a*l. 2010. The application of a solution from the dreg of tea-oil tree seeds in field earthworm sampling. *Sichuan Journal of Zoology*, **29**(3): 401-406.]

黄福珍. 1982. 蚯蚓. 北京. 农业出版社. [Huang FZ. 1982. Earthworm. Beijing: Agricultural Press.]

蒋际宝, 邱江平. 2018. 中国巨蚓科蚯蚓的起源与演化. 生物多样性, **26**(10): 48-56. [Jiang JB, Qiu JP. 2018. Origin and evolution of earthworms belonging to the family Megascolecidae in China. *Biodiversity Science*, **26**(10): 48-56.]

徐 芹, 肖能文. 2011. 中国陆栖蚯蚓.北京.中国农业出版社. [Xu Q, Xiao NW. 2011. Terrestrial Earthworms(Opisthopora: Oligochaeta) of China. Beijing. China Agriculture Press.]

颜绍馗, 张伟东, 刘燕新, 等. 2009. 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, **20**(1): 65-70. [Yan SK, Zhang WD, Liu YX, *et al*. 2009. Impact of heavy snow storm and freezing rain disasters on soil fauna in Chinese fir plantation in southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **20**(1): 65-70.]

姚 波, 孙 静, 蒋际宝, 等. 2018. 远盲蚓属蚯蚓在中国的地理分布及其对水热条件的响应. 动物学杂志, **53**(4): 554-571. [Yao B, Sun J, Jiang JB, *et al*. The distribution of *Amynthas* earthworm in China and its response to hydrothermal conditions. *Chinese Journal of Zoology*, **53**(4): 554-571.]

岳琳艳, 郑俊强, 韩士杰, 等. 2015. 长白山温带森林不同演替阶段土壤化学性质及微生物群落结构的变化. 生态学杂志, **34**(9): 2590-2597. [Yue LY, Zheng JQ, Han SJ, *et al*. 2015. Soil chemical properties and microbial community structure at different succession stages of temperate forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, **34**(9): 2590-2597.]

张春雨, 赵秀海, 赵亚洲. 2009. 长白山温带森林不同演替阶段群落结构特征. 植物生态学报, **33**(6): 1090-1100. [Zhang CY, Zhao XH, Zhao YZ. 2009. Community structure in different successional stages in north temperate forest of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **33**(6): 1090-1100.]

张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 2007. 蚯蚓在生态系统中的作用. 生物多样性, **15**(2): 142-153. [Zhang WX, Chen DM, Zhao CC. 2007. Function of earthworm in ecosystem. *Biodiversity Science*, **15**(2): 142-153.]

赵学鹏, 白学平, 李俊霞, 等. 2019. 气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应. 生态学杂志, **38**(3): 637-647. [Zhao XP, Bai XP, Li JX, *et al*. 2019. Response of *Larix olgensis* at different elevations to climate change in the context of climate warming. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(3): 637-647.

Bartlett MD, Harris JA, James IT, *et al*. 2006. Inefficiency of mustard extraction technique for assessing size and structure of earthworm communities in UK pasture. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**: 2990-2992.

Bartlett M D, Briones M J I, Neilson R, *et al*. 2010. A critical review of current methods in earthworm ecology: From individuals to populations. *European Journal of Soil Biology*, **46**: 67-73.

Blair JM, Parmelee RW, Allen MF, *et al*. 1997. Changes in soil N pools in response to earthworm population manipulations in agroecosystems with different N sources. *Soil Biolo-*

gy & Biochemistry, **29**: 361-367.

Bohlen PJ, Parmelee R W, Blair J M, *et al*. 1995. Efficacy of methods for manipulating earthworm populations in large-scale field experiments in agroecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, **27**: 993-999.

Bohlen PJ, Edwards CA, Stinner BR, *et al*. 1995. Manipulation of earthworm population in field experiments in agroecosystems. *Acta Zoologica Fennica*, **196**: 48-51.

Bohlen PJ, Parmelee RW, Mccartney DA, *et al*. 1997. Earthworm effects on carbon and nitrogen dynamics of surface litter in corn agroecosystems. *Ecological Applications*, **7**: 1341-1349.

Borek V, Morra MJ, Brown PD, *et al*. 1995. Transformation of the glucosinolate-derived allelochemicals allyl isothiocyanate and allylnitrile in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **43**: 1935-1940.

Callaham Jr MA, Hendrix PF. 1997. Relative abundance and seasonal activity of earthworms (Lumbricidae and Megascolecidae) as determined by hand-sorting and formalin extraction in forest soils on the southern Appalachian Piedmont. *Soil Biology & Biochemistry*, **29**: 317-321.

Chan KY, Munro K, 2001. Evaluating mustard extracts for earthworm sampling. *Pedobiologia*, **45**: 272-278.

Daniel O. 1992. Sampling of *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) in a meadow. *Pedobiologia*, **24**: 1425-1431.

De Wandeler H, Sousa-Silva R, Ampoorter E, *et al*. 2016. Drivers of earthworm incidence and abundance across European forests. *Soil Biology & Biochemistry*, **99**: 167-178.

East D, Knight D. 1998. Sampling soil earthworm populations using household detergent and mustard. *Journal of Biological Education*, **32**: 201-206.

Edwards CA, Bohlen PJ. 1996. Biology and ecology of earthworms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **64**: 426.

Eisenhauer N, Straube D, Scheu S. 2008. Efficiency of two widespread non-destructive extraction methods under dry soil conditions for different ecological earthworm groups. *European Journal of Soil Biology*, **44**: 141-145.

Evans AC, Guild WJ. 1947. Studies on the relationships between earthworms and soil fertility; biological studies in the field. *Annals of Applied Biology*, **34**(3): 307-330.

Gunn A. 1992. The use of mustard to estimate earthworm populations. *Pedobiologia*, **36**: 65-67.

Gutierrez-Lopez M, Moreno G, Trigo D, *et al*. 2016. The efficiency of earthworm extraction methods is determined by species and soil properties in the Mediterranean communities of Central-Western Spain. *European Journal of Soil Biology*, **73**: 59-68.

Karaca A. 2011. Biology of earthworms. Berlin, Springer-Verlag.

Pelosi C, Bertrand M, Capowiez Y, *et al*, 2009. Earthworm collection from agricultural fields: comparisons of selected expellants in presence/absence of hand-sorting. *European Journal of Soil Biology*, **45**: 176-183.

Roembke J, Jaensch S, Didden W. 2005. The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **6**: 249-265.

Raw F. 1959. Estimating earthworm populations by using formalin. *Nature*, **184**: 1661-1662.

Robertson GP, Coleman DC, Bledsoe CS, *et al*. 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. New York: Oxford University Press.

Schmidt O. 2001. Appraisal of the electrical octet method for estimating earthworm populations in arable land. *Annals of Applied Biology*, **138**: 231-241.

Singh J, Singh S, Vig AP. 2016. Extraction of earthworm from soil by different sampling methods: A review. *Environment, Development and Sustainability*, **18**: 1521-1539.

Staddon PL, Ostle N, Fitter AH. 2003. Earthworm extraction by electroshocking does not affect canopy CO_2 exchange, root respiration, mycorrhizal fungal abundance or mycorrhizal fungal vitality. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**: 421-426.

Steffen GPK, Antoniolli ZI, Steffen RB, *et al*. 2013. Earthworm extraction with onion solution. *Applied Soil Ecology*, **69**: 28-31.

Thielemann U. 1986. Elektrischer regenwurmfang mit der Oktett-Methode. *Pedobiologia*, **29**: 296-302.

Zou XM, Liu ZG. 2002. Exotic earthworms accelerate plant litter decomposition in a Puerto Rican pasture and a wet forest. *Ecological Applications*, **12**: 1406-1417.

作者简介 申智锋,男,1994年生,博士研究生,主要从事土壤动物研究。E-mail: zhifengshen1@163.com

责任编辑 李凤芹