

赤子爱胜蚓对森林凋落物的分解效率

张雪萍¹, 黄初龙^{1,2,3,4*}, 李景科⁵

(1. 哈尔滨师范大学地理系, 哈尔滨 150080; 2. 泉州师范学院资源与环境科学学院, 泉州 362000;

3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;

4. 中国科学院研究生院, 北京 100000; 5. 丹东业成贸易有限, 丹东 118000)

摘要:蚯蚓是帽儿山林区的主要土壤动物类群。饲养实验表明, 赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)对不同种类、不同腐解程度的木本植物叶片的摄食量不同, 对未分解叶的食性偏好依次为: 白桦(*Betula platyphylla*) > 杨(*Populus davidiana*) > 红松(*Pinus koraiensis*) > 蒙古栎(*Quercus mongolica*), 对半分解叶的食性偏好依次为: 杨 > 红松 > 蒙古栎 > 白桦, 对同种叶片半分解叶的消耗能力大于未分解叶。这表明叶片种类和叶子腐化程度是影响蚯蚓摄食偏好的两个主要因素, 混交林比纯林更有利于蚯蚓对难腐化叶片种类的分解。研究还表明, 赤子爱胜蚓生物量在盛夏、春末以增重为主, 夏初、秋初以失重为主, 对落叶的消耗能力随种群生物量增大而增大, 摄食量随温度的升高而增大, 说明影响蚯蚓分解能力的另两个重要因素是种群生物量和温度。比较研究表明, 从不适宜条件到适宜条件, 蚯蚓消耗能力的理论范围约为 6.378~27mg/(d·g)。能流研究表明, 不同生境下, 蚯蚓的各种生态效率变幅较大, 即, 毛增长效率: 2.34%~9.92%, 组织增长效率: 28.95%~90.86%, 同化效率: 8.10%~34.27%, 粪便率: 65.73%~91.90%。赤子爱胜蚓的毛增长效率与同化效率约为该林区另一类主要土壤动物马陆的两倍, 是帽儿山森林生态系统的重要分解者。因此, 通过林木种类优化配置、温湿度条件的改变, 可提高蚯蚓种群生物量及其分解能力, 加快寒区厚积凋落物层的分解, 加速林分更新。

关键词:赤子爱胜蚓; 物质循环; 能量流动; 生态效率; 森林生态系统

文章编号:1000-0933(2005)09-2427-07 **中图分类号:**Q958.11 **文献标识码:**A

Efficiencies of earthworms (*Eisenia foetida*) decomposing forest litters

ZHANG Xue-Ping¹, HUANG Chu-Long^{1,2,3,4*}, LI Jing-Ke⁵ (1. Life and Environmental Science College, Harbin Normal University, Harbin 150080, China; 2. College of Resource & Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun, Jilin 130012, China; 4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000 China; 5. Yecheng Trading Co., LTD, Dandong 118000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2427~2433.

Abstract: Earthworms form one of the main soil animal communities in the Maoer Mount Forest Ecosystem in Heilong Jiang Province. investigated the earthworm biota and its ecogeographical distribution in relation to abiotic environmental factors. For proper management of the Maoer Mount Forest, additional study was required. Here we evaluate the function of *Lumbricidae* in material circulation and energy flow in this forest ecosystem. The earthworms (*Eisenia foetida*) were grown indoors in typical dark brown soil and the leaf litter from Birch (*Betula platyphylla*), Poplar (*Populus davidiana*), Korean pine (*Pinus koraiensis*), and oak (*Quercus mongolica*) from Maoer Mount. The experiments were divided into two parts. For six months the earthworm's feeding preference of the four species of leaves mixed with soil was tested. In the second experiment, the energy efficiency of *E. foetida* was calculated from measures of O₂ uptake by worms using a SKW-3 Warburg apparatus and the caloric value of leaves was determined with a GB3500 calorimeter. Earthworms ingested leaves preferentially according to degree of decomposition, Fresh leaves mixed with soil ranking is for: pound birch, pound poplar, pound Korean pine, pound oak;

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40271006)

收稿日期:2004-10-21; **修订日期:**2005-07-02

作者简介:张雪萍(1962~), 女, 哈尔滨人, 教授, 主要从事土壤动物生态地理与环境生态学研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huangchulong@neigae.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 40271006)

Received date:2004-10-21; **Accepted date:**2005-07-02

Biography: ZHANG Xue-Ping, Professor, mainly engaged in environmental ecology.

whereas, for decomposed leaves on soil, pound poplar, pound Korean pine, pound oak, pound birch was preferred, it is almost the same ranking for fresh and decomposed. However, the ingestion rate for decomposed leaves is higher than for fresh leaves of those species. The experiments demonstrate that the main controlling factors influencing leaf wastage are plant species composition and degree of decomposition. A mixed forest is better for earthworms ingesting half-decomposed leaves and needles. The earthworm population's biomass increases at the end of spring and again in midsummer, but decreases in early summer and autumn. The decomposition rate for leaves is positively correlated with increasing *E. foetida* biomass. *E. foetida*'s feeding rate increases with increasing temperature indicating that population size and ambient temperatures are additional important factors in leaf material wastage. This energy study confirms that agreeable conditions can help increase the ecological efficiency of *E. foetida*. The range of changes are from 2.34% to 9.92% in gross growth efficiency, from 28.95% to 90.86% in tissue growth efficiency; from 8.10% to 34.27% in assimilation efficiency and from 65.73% to 91.90% in dejection efficiency. The percentages of gross growth and assimilation efficiencies are about double that of millipedes. in the same research area. This means that earthworms play more important roles in mass transfer in this forest ecosystem than millipedes. The faster material cycling in sub frigid temperature zone can be done by increasing the biomass and density of earthworms and by optimized deployment of different species of plants as well as changing environmental temperature and humidity conditions.

Key words: earthworms; circulation of materials; energy circuit; ecological efficiencies; forest ecosystem

20 世纪 90 年代以来,从第 4~第 7 届国际蚯蚓生态学专题讨论会(1990,1994,1998,2002)议题及已发表相关文献看,蚯蚓生态作用研究日益广泛而深入,从分子生态水平到景观生态水平,从基础研究到应用研究,已形成百家争鸣的格局^[1~19]。国外,蚯蚓与农业关系的研究较常见^[2~4],如,蚯蚓在作物根系疾病控制、堆肥、废物回收、土壤健康与可持续性的指示、土壤生物多样性的促进等方面的作用,人类生产活动对蚯蚓种群特征、生理生态、生活习性的影响等方面的研究,关于森林生态系统的蚯蚓研究还不多。我国的蚯蚓功能研究也集中于农业和污染生态系统,自然生态系统中蚯蚓生态功能的研究尚少见^[5]。而蚯蚓作为生物量最大的土壤动物类群,在森林生态系统中具有许多重要的环境生态作用^[1~3,15]。

黑龙江省帽儿山林区是我国森林生态系统定位研究站之一,对该生态系统的森林生理生态、鸟类等组成成分的研究已较深入,对其土壤动物的研究也已积累了 10 余年的资料,该林区已记录到的 43 类中小型土壤动物中,蚯蚓生物量占有绝对优势^[6]。本研究通过对该林区主要优势种赤子爱胜蚓的消耗能力和能量转化能力的测定,量化了蚯蚓在森林生态系统物质循环和能量流动中的作用,旨在为蚯蚓生物资源保护、森林资源管理提供科学依据。

1 自然概况

研究地点设在东北林业大学帽儿山实验林场,帽儿山位于东北东部山地张广才岭余脉,位于黑龙江省尚志市境内,地理位置为 127°30'~127°34'E,45°20'~45°25'N,主要为低山丘陵,平均海拔 300m,本区气候属于温带大陆性季风气候。年平均气温 2.7℃,日平均气温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的最长连续日数 150d 左右, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 2884℃。研究地区属于东亚东北部长白山植物区系,为东部山地温带针阔叶混交林地带,地带性植被是红松阔叶混交林,原地带性植被被破坏后逐步恢复为天然次生林。地带性土壤为暗棕壤。帽儿山试验区蚯蚓隶属于 1 目 2 科 6 个属,共 8 个种,以正蚓科(*Lumbricidae*)占绝对优势^[7],其中爱胜蚓属的赤子爱胜蚓、正蚓属的粉正蚓(*Lumbricus rubellus*)、双胸蚓属的微小双胸蚓(*Bimastos parvus*),分别占调查区所得蚯蚓总个体数的 37.25%、35.98%、11.32%,是该地区的优势种,该林区蚯蚓平均种群密度为 19.69 条/ m^2 ,平均生物量为 7.72g/ m^2 ^[7];蚯蚓种群空间分布上,各类林型中白桦林蚯蚓数量最少,蚯蚓个体数与生物量的垂直结构表聚性显著^[7,8];时间动态上,蚯蚓数量的变化规律表现为初秋>夏末>春末夏初>仲秋>盛夏^[8]。

2 材料与方法

实验用的凋落物、土壤(暗棕壤)与赤子爱胜蚓采自帽儿山森林。所有叶片和蚯蚓体重均用电子天平测定。

2.1 摄食选择和摄食能力实验(有土饲养)

蚯蚓摄食实验按蚯蚓生态习性设计,在人工饲养条件下进行。为了比较蚯蚓对不同种类与不同腐解程度叶片的取食偏好,并考察落叶消耗量和蚯蚓体重变化量的动态变化及其相关性,并量化蚯蚓在物质循环中的作用,为能量流动研究提供相关数据,于 5 月 9 日至 10 月 6 日进行了赤子爱胜蚓饲养实验,饲养温度随外界气温而变,实验用蚯蚓均采自帽儿山林区,共 18 条,未出现环带,生长状况良好。土壤经高温杀菌并去除其它土壤动物后,等量分置于 18 个饲养盆中。饲养盆直径 21cm,高 20cm。实验分 3 组:第 1 组喂未分解的红松针叶、杨树叶、桦树叶和蒙古栎叶;第 2 组喂半分解的红松针叶、杨树叶、桦树叶和蒙古栎叶;第 3 组喂混合叶,含前两组的各种叶片。每组都有一个重复参照组。

2.2 蚯蚓生态效率测定实验

为了解蚯蚓在森林生态系统能量流动中作用的大小和方式,本研究通过测定蚯蚓呼吸强度,求其耗氧能值,进而计算蚯蚓各种生态效率。蚯蚓呼吸量测定采用微量定积检压法。测定仪器为 SKW-3 型微量检压仪(Warburg 呼吸仪)。蚯蚓用清水洗净,用电子天平称体重,用量筒称体积。检压仪中央小井加碱 0.2ml,用于吸收蚯蚓呼出的 CO₂。水浴温度 25℃。测定时间为 5min。重复测定 15 次取平均值。红松针叶、桦树叶、蒙古栎叶、杨树叶及蚯蚓的热值是采用 GB-3500 型氧弹式热量计测定 5 次取平均值。蚯蚓生态效率根据动物次级生产过程方程式计算:

$$C = A + Fu, A = Pg + R, Pg = Lf + Pr, \text{即 } C = Pr + Lf + R + Fu$$

式中,C 为摄食量,A 为同化量,Fu 为粪尿量,Pg 为纯同化量,R 为呼吸量,Lf 为脱落物量,Pr 为净次级生产量(含所繁殖的幼体量)。次级生产过程方程式的各项值均用能量值表示。

3 结果与分析

3.1 蚯蚓在物质循环中的功能作用研究

3.1.1 蚯蚓食性选择

(1)叶子种类选择 在未分解叶组中,从平均每克蚯蚓每天的消耗量看,蚯蚓对未分解叶的食性偏好依次为白桦>杨>红松>蒙古栎(表 1),其原因是未分解叶片中,白桦最薄最软,而蒙古栎较厚较硬,一些硬质叶,如蒙古栎、松,常含较多的单宁质类化学物质^[10],不同类型落叶的可口性取决于叶的碳氮含量,是否有单宁等多酚类物质^[11],蚯蚓不喜欢富含酚或单宁多的植物,但含氮及碳水化合物多的植物蚯蚓则较喜欢^[12]。低 C/N 比的物质则更受蚯蚓喜欢^[12,13]。

在半分解叶组中,从平均每克蚯蚓每天的消耗量看,蚯蚓对半分解叶的食性偏好与未分解叶组比较,杨、红松、蒙古栎的顺序不变,而蚯蚓对白桦叶的摄食量却比蒙古栎叶还少。说明 4 种叶经过半分解后,前 3 种叶片的可口性提高程度远大于白桦,也可能喂养用的白桦叶腐解程度比前三者轻。这个结果与张雪萍关于马陆的实验结果是一致的^[31]。说明叶片种类和叶子腐化程度是影响蚯蚓摄食偏好的两个主要因素。

混合叶组的消耗量大致接近于未分解叶和半分解叶的平均消耗量 6.378mg/(d·g),基本上能反映本实验数据的可靠性或一致性,也表明混交林有助于难分解叶的加速分解。

表 1 单位体重蚯蚓日平均食物消耗量

Table 1 The average daily leaf wastage per biomass of earthworm from May to October										
项目 Items	蒙古栎 Mongolica oak		杨 Poplar		红松 Korean pine		白桦 Birch		平均 Average	
	V _b	V _e	V _b	V _e	V _b	V _e	V _b	V _e	V _b	V _{ed}
未分解叶 Fresh leaves	2.44	42.1792	5.9367	112.7053	4.7886	83.9758	7.3048	133.0448	6.378	1040.8695
半分解叶 Decomposed leaves	7.2032	120.7563	9.4155	160.6775	8.7062	140.6134	5.2292	92.8682		
混合叶平均 Average of Mixed leaves						5.5958				

* 表中数据来自有土饲养实验,下同;V_b表示单位鲜蚓重每天消耗叶片生物量速率(mg/(FWg·d));V_e表示单位鲜蚓重每天消耗叶片能量速率(J/(FWg·d));V_{ed}单位干蚓重每天消耗 4 种叶片(含未分解叶和半分解叶)能量的平均速率(J/(DWg·d)) The data are from soil breeding experiment, so is the following content;V_b denotes daily leaf biomass decomposing rate by earthworm(mg/(FWg·d)); V_e denotes daily leaf energy decomposing rate by earthworm(J/FWg·d); V_{ed} denotes average daily leaves energy decomposing rate by dry earthworm(J/DWg·d)

(2)不同腐解程度叶片的选择 5 个月的饲养实验表明,蚯蚓对半分解叶的消耗量明显大于未分解叶的消耗量。由表 1 可知,4 种未分解叶的平均消耗量为 5.1175mg/(d·g),4 种半分解叶的平均消耗量为 7.6385mg/(d·g),可见蚯蚓对腐解程度不同的食物同化能力不同。

蚯蚓对腐解程度不同的叶片的食性偏好研究表明,蚯蚓对半分解叶的消耗量明显大于未分解叶的消耗量。原因可能是半分解叶片均已破损并有霉斑菌丝等,特别是针叶,霉斑很多,3 种叶片的质地都较未分解叶片变薄变脆,提高了其适口性^[14],既有利于蚯蚓进食,也有利于蚯蚓对落叶的消化。这证实了落叶分解中蚯蚓与微生物的协同作用、互相促进作用,蚯蚓的摄食分解为微生物的进一步分解作准备,微生物的分解加快了蚯蚓对落叶的摄食速度^[15,16]。同时也说明,尽管蚯蚓体内富含蛋白酶、脂肪分解酶、纤维酶、甲壳酶、淀粉酶等物质,且消化道中还有大量的细菌、酶菌、放线菌等微生物与之共存,具有极强的吞食、转化改造有机物的能力^[16],但在可供选择的食物前,仍然更喜食由微生物作用后的、半分解的凋落物。从各种叶型看,杨,松,栎的半分解叶消耗量远大于未分解叶的消耗量。

3.1.2 落叶消耗量与蚯蚓体重变化量动态分析

(1)实验条件下(表 2),全年各月平均单位蚓体重日增长量为 5.3482mg/(g·d),个体小的蚯蚓易增重,从各月平均值看,盛夏(7、8 月份)、春末(5 月份)以增重为主,夏初(6 月份)、秋初(9 月份)以失重为主。

饲养结果表明,蚯蚓增重有正有负,通常个体大的适应能力较差,容易死亡或失重,失重的 31 条蚯蚓有 23 条的体重大于 0.6g,单条最大失重量为单月失重 0.5713g,最大单位体重失重量为 24mg/(d·g),失重量占原体重的 72%。而个体小,适应性强,个体普遍增重,单条最大增重量达单月增重 1.358g,最大单位体重增重量为 263mg/(d·g),增重量占原体重的 790%。失重的个体占实验个体数的 34.44%,死亡的个体占实验个体数的 16.67%。从各月单位蚓重变化量及其占放入时体重百分比的平均值看,5、7、8 月份为增重,8 月份增重最大,8 月份平均增重幅度达 49.69%;6、9 月份失重,9 月份失重最多,平均失重幅度达 2.55%。

表 2 各饲养盆单位蚓重变化量及其变化百分比

Table 2 The amount of biomass change per gram of earthworm and its percentage in the dishes										
时间 Time	5 月 May		6 月 June		7 月 July		8 月 August		9 月 September	
盆类 Dishes	ΔB (mg/(g·d))	P (%)	ΔB (mg/(g·d))	P (%)	ΔB (mg/(g·d))	P (%)	ΔB (mg/(g·d))	P (%)	ΔB (mg/(g·d))	P (%)
栎未 Fresh oak	7.259	21.78	-8.903	-26.71	0.885	2.66	-2.185	-6.56	-4.028	-12.08
杨未 Fresh poplar	7.698	23.10	-2.142	-6.42	-5.631	-16.90	2.833	8.50	-1.884	-5.65
松未 Fresh korean pine	13.342	40.03	0.000	0.00	7.361	22.08	-6.966	-20.90	1.141	3.42
桦未 Fresh birch	6.584	19.75	8.987	26.96	3.321	9.97	13.432	40.30	2.539	7.62
栎半 Decomposed oak	6.941	20.83	-0.880	-2.64	4.003	12.01	0.746	2.24	-1.563	-4.69
杨半 Decomposed poplar	6.770	20.31	-5.168	-15.50	0.810	2.43	0.694	2.09	4.341	13.02
松半 Decomposed korean pine	3.730	11.19	9.505	28.51	1.050	3.15	2.758	8.28	-3.482	-10.45
桦半 Decomposed birch	13.934	41.81	11.232	33.70	4.960	14.88	7.259	21.78	-2.034	-6.10
混合叶 Mixed	-2.490	-7.47	-13.063	-39.19	17.428	52.29	130.501	391.50	-0.952	-2.86
平均 Average	7.085	21.26	-0.048	-0.14	3.799	11.40	16.563	49.69	-0.658	-1.97

ΔB 是指单位蚓重平均变化量, P 是指日均蚯蚓平均增重率, ΔB denotes daily biomass change per gram of earthworm; P denotes average daily biomass increase percentage of earthworm

(2)蚯蚓对落叶的消耗能力与蚯蚓种群生物量的大小密切相关 落叶消耗量动态与蚯蚓体重变化量动态相关分析表明(表 3),月总消耗量与未、半、混 3 种分解叶盆单位蚓重变化量及单位蚓重总变化量成正相关,相关系数分别为 0.6574,0.8627,0.369,0.7188。8 月份日平均单位蚓体重消耗量最大,达 9.42mg/(g·d)以上,其蚯蚓平均增重幅度也最大,达 49%以上,说明了落叶消耗与蚯蚓体重密切相关,蚯蚓体重降低,落叶消耗量也降低,因此,增加帽儿山森林蚯蚓种群生物量,可增强蚯蚓的生态功能。

表 3 落叶消耗量和蚯蚓体重变化量与气温动态

Table 3 The dynamics of temperature, wastage of leaf and earthworm biomass					
类别 Items	月份 Month				
	5	6	7	8	9
未分解叶总消耗量(WF)Total wastage of fresh leaves(g)	2.5965	2.7721	3.4598	3.2448	2.5959
半分解叶总消耗量(WD)Total wastage of decomposed leaves(g)	5.8299	4.1221	4.0836	5.0138	4.3203
混合叶总消耗量(WM)Total wastage of mixed leaves(g)	1.1216	0.9513	0.8803	0.426	0.5394
月总消耗量(EA)Total monthly wastage of all leaves(g)	9.5480	7.8455	8.4236	8.6846	7.4556
未分解叶盆单位蚓重变化量(Δ_1)Biomass chang per biomass of earthworm in fresh leaf dish(g/g)	+0.1831	-0.7714	-0.1058	-0.0499	-0.1477
半分解叶盆单位蚓重变化量(Δ_2)Biomass chang per biomass of earthworm in decomposed leaf dish(g/g)	+0.1431	-0.4382	+0.0093	+0.0682	-0.2867
混合叶盆单位蚓重变化量(Δ_3)Biomass chang per biomass of earthworm in mixed leaves dish(g/g)	-0.0515	-0.2428	+0.4090	+0.6227	-0.0285
单位蚓重总变化量(Δ_4)Total biomass chang per biomass of earthworm (g/g)	+0.1537	-0.6101	+0.0159	+0.0953	-0.1911
月初单位蚓体重日消耗量(EE)Even daily wastage per biomass of earthworm in early month(mg/(g·d))	8.4150	5.4330	8.8878	9.4173	7.0077
月均气温(T)Even monthly temperature(℃)	16.35	19.48	22.98	20.46	16.22

“+”表示增重,“-”表示失重; Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 指各月蚓重总变化量与各月月初放入蚓重的比值; Δ_4 是指各月 18 个盆放入蚯蚓总体重的增重量或失重量;死亡的蚯蚓体重计为失重量;“+”denotes increase,“-”denotes decrease. Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 denote the total monthly biomass chang per earthworm biomass put in dish in early month; Δ_4 denotes total biomass chang per earthworm biomass of all dishes; obituary earthworms include into the decrease biomass

(3)摄食量随温度的升高而增大 落叶消耗量与气温相关分析表明(表 3),未分解叶的总消耗量与气温成正相关,相关系数 $r=0.947$,说明未分解叶盆中蚯蚓随气温升高,消耗能力增强。半、混分解叶总消耗量及 3 种叶月总消耗量与气温相关不明显。但除 5 月份外,其他月份各类蚓重变化量与气温变化成正相关。5 月份的未分解叶和半分解叶盆中的蚯蚓增重明显,且增重量都远大于其他月份,因为 5 月土壤的各项理化特征较理想,6 月份连降大雨,土壤过湿,蚯蚓摄食能力减弱造成的。

日平均单位蚯蚓体重消耗量与气温相关分析表明,盛夏(7~8 月份)的日消耗量远高于其它月份,消耗量动态基本上反映了气温的变化,即蚯蚓消耗能力随气温的升高而增强。

综上,叶片种类、叶子腐化程度、种群生物量、温度是影响蚯蚓分解能力的主要因素。环境条件,特别是水热条件对蚯蚓的消耗能力和体重的变化起重要作用,蚯蚓摄食量随温度的升高而增大,说明改善森林自然环境条件可增强蚯蚓种群在物质循环中的作用。

3.1.3 帽儿山蚯蚓在凋落物分解中的贡献 因多数种类蚯蚓的适宜活动温度在 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间,按本次实验所得数据,本区蚯蚓分解天数达 150d 以上。4 个林型各次采样总平均蚯蚓生物量达 $8.036\text{g}/\text{m}^2$,4 个林型平均凋落物量为 $885\text{g}/\text{m}^2$,则烘干重约 $808.096\text{g}/\text{m}^2$ 。

(1)有土蚯蚓饲养实验(表 2)表明,蚯蚓对 8 种叶型叶片平均日摄食速率(摄食量与分解量)为 $6.378\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})$,不包括食入的土壤。因此,蚯蚓年消耗落叶量占帽儿山地区年平均落叶量的百分数达 $150\text{d}\times 6.378\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})\times 10^{-3}\text{g}/\text{mg}\times 8.036\text{g}/\text{m}^2\div 808.096\text{g}/\text{m}^2\times 100\%=0.952\%$ 以上。则每公顷林区蚯蚓消耗的凋落物量为 $8.08\text{t}\times 0.952\%=76.922\text{kg}$ 。

(2)按温带落叶林蚯蚓摄食量估算值 $27\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})$ ^[10]来计算,蚯蚓年消耗落叶量占帽儿山地区年平均落叶量的百分数达 4.028% 。则每公顷林区蚯蚓消耗的凋落物量为 325.46kg 。

总之,蚯蚓对落叶的消耗能力都远高于马陆的 0.21% ^[17],再次证明了蚯蚓是土壤动物的主要类群,也是土壤动物中对落叶分解的主要贡献者。

总结:蚯蚓的消化分解作用研究表明,有机质的分解程度及环境条件的适宜程度对蚯蚓的生物生产力起决定性的作用。从适宜条件到不适宜条件,蚯蚓消耗有机物的能力依次为:自然生境(温带落叶林估算值 $27\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})$)>长期强制人工生境(半分解叶喂养测定值 $7.6385\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})$)>混合叶喂养测定值 $5.5958\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})$ >未分解叶喂养测定值 $5.1175\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{g})$)。因此,改善森林自然环境条件可增强蚯蚓种群在物质循环中的作用。

3.2 蚯蚓在森林生态系统能量流动中的作用

枯枝落叶和分解者(土壤微生物和动物)之间的能量流动是生态系统能量流动全过程的一个重要环节。森林是地球上主要的太阳能固定系统,其通过光合作用固定的能量,大部分以枯枝落叶的形式储存于地表。蚯蚓就是以枯枝落叶为能源进行代谢活动,从而不断地将其能量释放出来。关于这方面的研究,目前国内报道极少,对帽儿山林区生物量最大的土壤动物类群——蚯蚓进行呼吸量测定,从而了解其在森林生态系统能量流动中的作用大小意义重大。

3.2.1 蚯蚓呼吸量 经过多次重复测定,得到蚯蚓的干鲜重换算比为 10.65% ,黄福珍的测定结果为 $12\%\sim 21\%$,其差别可能是由于测定所用的蚓种不同。

15 次呼吸实验得到的有效 Brodie 液面差值的平均值为 $\Delta h=4\text{mm}$ 。测得蚯蚓平均体重为 0.5968g ,平均体积为 $450\mu\text{l}$ 。测定时间为 0.0833h 。

反应瓶平均体积为 $20987.5\mu\text{l}$,中央小井碱体积 $V_f=200\mu\text{l}$,则 $V_g=20987.5-(200+450)=20337.5\mu\text{l}$ 。水浴温度 $T=273+25=298$ 。参数 $\alpha=0.02831$, $P_0=10000\text{mm}$ 。

根据 $K=\left(V_g\frac{273}{T}+V_f\alpha\right)/P_0$ 式求得 $K=1.8637$,则耗氧量 $X=\Delta h\cdot K=7.4548\mu\text{l}$,进而求得蚯蚓呼吸强度为 $149.96\mu\text{l FWg}/\text{h}$,则蚯蚓平均耗氧能值 $R\approx 253.45\text{J}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$ 。

3.2.2 蚯蚓生态效率

(1)按本实验各种平均值计算的各项生态效率 由表 2 可得 $P_g=5.3482\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})\approx 103.26\text{J}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$,每克蚓体重日摄食量的平均值 $C\approx 1040.87\text{J}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$ (表 1)。

根据动物次级生产过程方程式,已知 $R=253.45\text{J}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$,则 $A=356.71\text{J}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$, $Fu=684.16\text{J}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$ 。在本实验中,蚯蚓没有产茧,也没有其它脱落物等现象,故 $Lf=0$,则 $Pr=P_g=103.26\text{J}/(\text{DWg}\cdot\text{d})$ 。

由次级生产过程公式可以求得蚯蚓的生态效率如下:毛增长效率 $P_g/C=9.92\%$,组织增长效率 $P_g/A=28.95\%$,同化效率 $A/C=34.27\%$,粪便率 $Fu/C=65.73\%$ 。

(2)按本次实验蚯蚓增重幅度最大的 8 月份混合叶盆的 P_g 计算,可得本实验蚯蚓最大组织增长效率为 $P_g/A=90.86\%$ 。

(3)按 Satchell 的估计值^[10] $C=27\text{mg}/(\text{d}\cdot\text{DWg})$ 计算(其它数据采用本实验的各种平均值),毛增长效率 $P_g/C=2.34\%$,同

化效率 $A/C=8.10\%$, 粪便率 $Fu/C=91.90\%$ 。

综上,按本实验所得的各项数据和温带自然状态下蚯蚓摄食量估算值,可知各种生态效率的范围为:毛增长效率, $2.34\% \sim 9.92\%$;组织增长效率, $28.95\% \sim 90.86\%$;同化效率, $8.10\% \sim 34.27\%$;粪便率, $65.73\% \sim 91.90\%$ 。

4 讨论

4.1 混交林比纯林更有利于蚯蚓对难腐化叶片种类的分解

蚯蚓对不同叶片种类的食性偏好研究表明,无论是半分解叶,还是未分解叶,杨树叶的消耗量始终大于红松针叶和蒙古栎叶,说明可在红松林和蒙古栎林中间种杨树,以增加林内的蚯蚓数量,加快针叶和蒙古栎叶的分解。混合叶的分解量大于杨未、红松未、蒙古栎未,说明不同树种相间种植,有利于落叶的分解。另一方面,混交林可增大生态系统的复杂性,增加整个生态系统的稳定性,增强抗干扰能力,也有利于林内蚯蚓的生长和繁殖,从而增加林内的蚯蚓数量和种类多样性,加快整个林区落叶的分解速度。生态分布调查已经证实混交林的蚯蚓数量不小于纯林。此外,半分解叶的分解量以白桦叶最少,而白桦林的蚯蚓数量也最少,说明蚯蚓的分布在一定程度上也受其食物来源影响。

4.2 生境条件的优劣对蚯蚓的生物生产力起决定性的作用

物质分解研究表明,蚯蚓在不同的环境条件下对有机物的处理能力差别较大,理论范围约为 $6.378 \sim 27\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{g})$;能量流动研究也表明不同的生境下蚯蚓的各种生态效率有较大的波动范围。因此,改善蚯蚓生境条件能大幅度提高蚯蚓的物质分解的能力。

4.3 蚯蚓在森林生态系统能量流动中的作用应引起更多关注

比较各项生态效率可知,蚯蚓是高粪便率的土壤动物,说明它们通过排便的磨碎混合过程促进分解的作用,比通过对有机物的同化吸收、生长、死亡再被微生物分解回到土壤圈的分解作用都更强。因此,增加森林生态系统中蚯蚓的个体数比增大其生物量更为重要。同时,蚯蚓的毛增长效率与同化效率约为该林区另一类主要土壤动物马陆的两倍^[17],说明蚯蚓是帽儿山森林生态系统最重要的分解者,应引起土壤动物生态学研究者的更多关注。

总之,在许多温带生态系统中,蚯蚓参与有机物质分解、营养循环过程的调节、土壤物理属性与化学过程的改变已较为公认^[18,19]。然而,对这些交互作用的本质和机制的了解仍较缺乏^[20],特别是有关蚯蚓功能研究中的能量流动研究在国内几乎是空白领域,有待深入探讨。

References:

- [1] Tripathi G, Bhardwaj P. Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg). *Bioresource Technology*, 2004, **92**(3): 275~283.
- [2] Tripathi G, Bhardwaj P. Decomposition of kitchen waste amended with cow manure using an epigeic species (*Eisenia fetida*) and an anecic species (*Lampito mauritii*). *Bioresource Technology*, 2004, **92**(2): 215~218.
- [3] John W Doran, Michael R Zeiss. Soil health and sustainability; managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecol.*, 2000, **15**(1): 3~11.
- [4] Jordan D, Miles R J, Hubbard V C, *et al.* Effect of management practices and cropping systems on earthworm abundance and microbial activity in Sanborn Field: a 115-year-old agricultural field. *Pedobiologia*, 2004, **48**(2): 99~110.
- [5] Qiao Y H, Cao Z P, Wang B Q, *et al.* Impact of soil fertility maintaining practice on earthworm population in low production agro-ecosystem in north China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(4): 700~705.
- [6] Zhang X P, Cui G F, Chen P. Study on biomass of soil animals in artificial larch forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, **7**(2): 150~154.
- [7] Huang C L, Cao H C, Zhang X P. The ecological distribution of earthworms in Maoer Mount Forest Ecosystem. *Natural Sciences Journal of Harbin Normal University*, 2003, **19**(6): 92~95.
- [8] Huang C L, Huang C Q, Zhang X P. The study on connection between ecological distribution and environmental factors of earthworms in Maoer Mount forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(1): 9~14.
- [9] Huang C L, Zhang X P, Huang L R. Study on Earthworm community dynamics in Maoer Mount Forest Ecosystem. *Forest Engineering*, 2004, **20**(1): 3~4.
- [10] Edwards C A, Lofty J R. *Earthworms Biology*. Beijing: Science Press, 1984. 18~226.
- [11] Satchell J E, Lumbricidae. In: Burges, A. and F. Raw eds. *Soil Biology*. New York: Academic Press, 1967. 259~322.
- [12] Huang F Z. *Earthworms*. Beijing: Agricultural Press, 1982. 1~226.
- [13] Ruz Jerez E, Ball P R and Tillman R W. The role of earthworms in nitrogen release from herbage residues. In: Jenkinson, D. S. and K.

- A. Smith eds. *Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils*. (publisher unknown). 1988. 355~370.
- [14] Cortez J, Hameed R and Bouche M B. C and N transfer in soil with or without earthworms fed with C and N-labeled wheat straw. *Soil Biol. Biochem.*, 1989, **21**(4):491~497.
- [15] Zhang L H, Xu G H. Effects of microorganisms in synchronization with earthworms on the fertilities of soil. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, **10**(2):116~120.
- [16] Parle J N. A microbiological study of earthworm casts. *J. Gener. Microbiol.*, 1963, **31**:13~22.
- [17] Zhang X P, Li C Y, Zhang S C. Study of the function of Millipedes in substance decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1):75~79.
- [18] Lee K E. *Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use*. New York: Academic Press, 1985.
- [19] Anderson J M. Invertebrate-mediated transport processes in soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **24**(1~3):5~19.
- [20] Edwards C A. *Earthworm ecology*. Boca Raton. Fla: St. Lucie Press, 1998.

参考文献:

- [5] 乔玉辉, 曹志平, 王宝清, 等. 不同培肥措施对低肥力土壤生态系统蚯蚓种群数量的影响. *生态学报*, 2004, **24**(4):700~705.
- [6] 张雪萍, 崔国发, 陈鹏. 人工落叶松林土壤动物生物量的研究. *应用生态学报*, 1996, **7**(2):150~154.
- [7] 黄初龙, 曹慧聪, 张雪萍. 帽儿山森林生态系统蚯蚓区系组成研究. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2003, **19**(6):92~95.
- [8] 黄初龙, 黄初齐, 张雪萍. 帽儿山森林生态系统蚯蚓生态分布研究. *生态学杂志*. 2005, **24**(1):9~14.
- [9] 黄初龙, 张雪萍, 黄丽荣. 帽儿山森林生态系统蚯蚓种群动态研究. *森林工程*, 2004, **20**(1):3~4.
- [10] C. A. 爱德华兹, J. R. 洛夫蒂. 蚯蚓生物学. 北京: 科学出版社, 1984. 18~226.
- [12] 黄福珍. 蚯蚓. 北京: 农业出版社, 1982. 1~226.
- [15] 张立宏, 许光辉. 微生物和蚯蚓的协同作用对土壤肥力影响的研究. *生态学报*, 1990, **10**(2):116~120.
- [17] 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. *生态学报*, 2001, **21**(1):75~79.