

小兴安岭森林生态系统中营养元素关系 及土壤动物的作用

殷秀琴¹, 刘继亮^{1, 2}, 高 明³

(1 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024 2 中国科学院寒区旱区
环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000 3 辽东学院城市与环境系, 辽宁 丹东 118003)

摘要: 对小兴安岭森林生态系统 6 个主要林型的凋落叶、土壤动物和土壤三者之间营养元素关系研究, 凋落叶、土壤动物和土壤中营养元素的平均含量不同, 它们的变异程度也不同。蚯蚓、线蚓、蜈蚣和其它类群土壤动物体内营养元素的方差分析结果表明, K、Ca Mg、Fe 对土壤动物的生长发育影响较大。凋落叶、土壤动物和土壤之间 K、Na Fe 的线性关系较强, 反映了凋落叶 - 土壤动物 - 土壤间 K、Na Fe 联系密切。凋落叶和土壤中营养元素与土壤动物的生物量、密度和类群数的关系密切, 平均关联度的顺序为, 类群数 > 生物量 > 密度。

关 键 词: 土壤动物; 凋落叶; 土壤; 营养元素; 小兴安岭

中图分类号: S154.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2000)07-0814-06

陆地生态系统的营养元素主要通过地下生态过程的转化来完成其生态功能, 地下生态过程对营养循环的作用与调控已成为生态学研究中的一个热点^[1, 2]。土壤动物是陆地生态系统的重要组成部分^[3, 4], 在养分循环中起着重要的作用, 凋落物是土壤动物的食物和能量来源, 而土壤动物是森林凋落物的重要分解者^[5~8]。一般来说, 土壤动物活动对生态系统过程产生最终的影响是提高有机质的分解速率和养分的周转量^[9]。目前对于凋落物分解过程中土壤动物群落的变化及土壤动物在凋落物分解中的作用研究国内外已有一些报道, 但对森林生态系统凋落物、土壤动物和土壤三者之间营养元素关系的研究报道甚少^[10], 本文通过对小兴安岭不同林型凋落叶、土壤动物和土壤中营养元素的研究, 探讨土壤动物体内营养元素与凋落物、土壤中营养元素的关系以及土壤动物在凋落物 - 土壤系统中元素转化中的作用, 为森林生态系统的功能作用研究及森林的可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于中国黑龙江省凉水国家自然保护区, 属于小兴安岭山脉的东南段, 达里带岭支脉的东坡, 地理位置为 128°47'8"~128°57'19"E, 47°6'

49"~47°16'10"N。保护区平均海拔 400 m, 属低山丘陵, 平均坡度 10°~15°。气候属温带大陆性季风气候, 冬长夏短, 年均温 -0.3℃, 年平均降水量 680 mm 左右, 冻土深 2 cm 左右 (少数沟谷云冷杉林下有长期冻土), 土壤主要为山地暗棕壤。地带性植被为红松阔叶混交林 (阔叶红松林)^[11, 12]。海拔较高处为阔叶红松林, 沟谷地带有云冷杉林、兴安落叶松林、毛赤杨林及河岸柳丛。凡经采伐处, 1955 年起陆续营造人工林, 主要为兴安落叶松林和红松林。

2 研究方法

2.1 野外方法

在保护区选取阔叶红松林 (A)、次生白桦林 (B)、云冷杉林 (C)、兴安落叶松林 (D)、人工兴安落叶松林 (E)、人工红松林 (F) 6 个林型, 每一林型中设 3 个样方, 样方面积为 1 m × 1 m, 选取代表性乔木凋落叶。在阔叶红松林中选择红松叶和紫椴叶, 次生白桦林中选择白桦叶, 云冷杉林选取云杉叶和冷杉叶, 兴安落叶松林和人工兴安落叶松林中选择兴安落叶松叶, 人工红松林中选择红松叶。土壤动物采用手捡法, 每个林型设 3 个样方, 样方面积 50 cm × 50 cm, 分 4 层取样, 即凋落物层、0~10

收稿日期: 2006-08-23 修订日期: 2006-12-04
基金项目: 国家自然科学基金 (40171053) 项目、东北师范大学测试基金项目资助。
作者简介: 殷秀琴 (1951-), 女, 吉林长春人, 教授, 主要从事土壤动物生态学和生物地理学研究。E-mail: yinxq773@nenu.edu.cn

10~ 20和 20~ 30 cm,在土壤动物取样的同时采集0~ 20 cm 土壤样品。

2 2 室内方法

将野外采集的土壤动物带回室内鉴定,统计不同种类的密度,测定其生物量(表 1)。然后将土壤动物分为蚯蚓、蜈蚣、线蚓和其它 4 个类群(其它类群指挑出生物量较大的蚯蚓、蜈蚣、线蚓后剩余的各类土壤动物,由于这些土壤动物生物量较低,达不到元素含量检出下限,因而分析营养元素时作为一个类群来考虑)。将选取的凋落叶、土壤动物和土壤样品,经自然风干、研磨、过筛处理后,采用原子吸收法(220FS 原子吸收分光光度计,美国 Varian)分别测定凋落叶、土壤动物和土壤全 K、

Na Ca Mg Fe的含量。
数据处理采用 EXCEL2003进行线性拟合,用 SPSS13 0进行 Pearson相关分析,运用 DPS进行线性回归分析和灰色关联分析。

3 结果与讨论

3 1 凋落物中的营养元素含量

图 1可以看出,6个林型凋落叶中 Ca的平均含量远高于其它元素,Na的含量较低,林型 B和林型 E凋落叶中 Ca的含量低于其它林型。6个林型凋落叶中营养元素平均含量为:Ca> Mg> K> Fe> Na 凋落叶中营养元素含量的变异系数大小为:Fe> Mg> Ca Na> K, Fe元素的变异系数远高于其

表 1 不同林型土壤动物密度(只 /m²)、类群及生物量统计
Table 1 Density, group and biomass of soil fauna in different forest types

动物名	A	B	C	D	E	F
线蚓 Enchytraeidae	188	168	176	540	24	10 7
石蜈蚣 Lithobiidae	48	22 7	62 7	8	12	13 3
蚁 Formicidae	6 7	5 3	4		1 3	13 3
正蚓 Lumbricida	33 3	5 3	10 7	10 7	26 7	21 3
地蜈蚣 Geophilidae	22 7	13 3	24	16	2 7	5 3
马陆 Juliformia	13 3	9 3	16	1 3	4	2 7
双翅类幼虫 Diptera	4	9 3	16	13 3	6 7	4
蜘蛛 Araneida	6 7	5 3	10 7	6 7	5 3	1 3
鞘翅类幼虫 Coleoptera	9 3	1 3	8	2 7	2 7	2 7
隐翅虫 Staphylinidae	2 7		1 3			1 3
鳞翅类幼虫 Lepidoptera	1 3	1 3		6 7	2 7	
金龟子幼虫 Scarabaeidae	4	1 3				2 7
蛞蝓 Limacidae		2 7	1 3	2 7	2 7	1 3
步甲 Carabidae	1 3	5 3	5 3			
鳞跳虫 Tomoceridae		1 3		2 7		
摇蚊幼虫 Chironomidae			1 3		6 7	
蜗牛 Valloniidae			1 3	2 7		
槲果螺 Cochlicopidae	4					1 3
象甲 Curculionidae		1 3	1 3			
瘿蚊 Cecidomyiidae			5 3			
石蛎 Machilidae	4					
蚜 Aphididae				2 7	1 3	
巴蜗牛 Bradybaenidae		4				
缘蝽 Coreidae			2 7			
棘跳虫 Onychiuridae		2 7				
蝉 Cicadidae		1 3	1 3	2 7		
瓢虫幼虫 Coccinellidae	1 3					
小蜂 Chalcidae	1 3					
蝽 Pentatomidae	1 3					
金龟子 Scarabaeidae				1 3		
瓢虫 Coccinellidae			4			
密度合计(只 /m ²)	353 3	261 3	353 3	620	98 7	81 3
类群合计	18	18	19	15	13	13
生物量(湿重, g/m ²)	15 20	4 99	5 34	6 86	7 56	3 52

它元素, 5 种营养元素的变化范围较大 (12% ~ 53%)。林型 D 和 E 同为兴安落叶松林, 林型 D 的凋落叶中 K、Na、Ca 的含量高于林型 E, 但 Mg、Fe 的含量低于林型 E, 反映了天然林和人工林同种凋落叶营养元素含量存在差异。

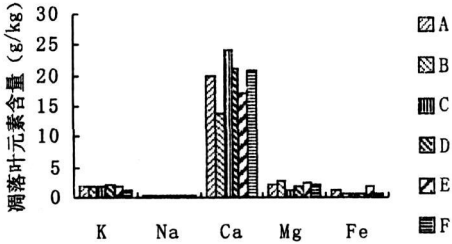


图 1 不同林型凋落叶营养元素含量
Fig 1 Nutrient elements of litter in different forest types

3 2 土壤动物体内营养元素含量

土壤动物本身就是一个营养成分的贮藏库, 具有“源与汇”的调控功能, 同时土壤动物通过其新陈代谢促进各种营养元素的转化, 易于被植物摄取利用^[13]。由图 2 可知, 林型 E 中的土壤动物体内 K、Na 和 Fe 的含量高于其它林型, 而林型 E 中土壤动物体内的 Ca 和林型 B、C、D 的土壤动物体内的 Fe 明显低于其它林型。Ca、Fe 的含量变化较大, 土壤动物体内营养元素含量的变异系数的大小为: Fe > Ca > Na > Mg > K, 6 个林型土壤动物体内营养元素含量的变异系数较大 (20% ~ 40%), 说明 6 个林型土壤动物体内营养元素含量差异较大。6 个林型土壤动物体内营养元素的平均含量为: Ca > Fe > K > Na > Mg。研究区大型土壤动物以蚯蚓、线蚓和蜈蚣为主, 而沙漠土壤动物是以鞘翅目为主, 土壤动物体内 5 种元素的含量为: Mg > K > Fe > Ca > Na^[14], 这与本文的研究差异较大, 说明土壤动物种类组成和优势类群所占的比重对土壤动物总的营养元素含量影响较大。

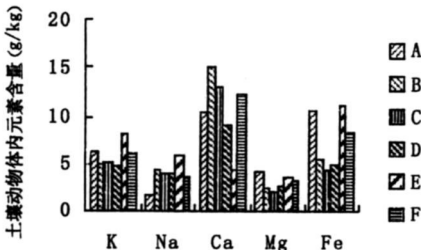


图 2 不同林型土壤动物体内营养元素含量
Fig 2 Nutrient elements of soil fauna in different forest types

蚯蚓、线蚓作为森林生态系统主要的分解者直接参与凋落物分解, 它们在凋落物和土壤中的活动也影响其它土壤动物类群的分解作用, 蜈蚣是土壤中的大型捕食者, 控制了其它小型类群的群体结构, 不同土壤动物体内营养元素含量存在一定差异, 通过对 6 个林型蚯蚓、线蚓、蜈蚣和其它类群体内营养元素含量的方差分析结果表明, K、Ca、Mg、Fe 元素在 4 类土壤动物内的差异极显著 ($df = 3, p < 0.001$), 但 Na 的差异不显著 ($df = 3, p > 0.05$), 说明 K、Ca、Mg、Fe 对土壤动物的生长发育影响较大。

3 3 土壤中营养元素含量

土壤为森林生态系统的物质供应起着重要作用, 是生物长期稳定的物质来源。由图 3 可知, 6 个林型土壤中 Fe 的含量最高, Mg 的含量最低, Ca 的含量变化较大, 林型 C 的土壤中 Fe 的含量低于其它林型, 林型 A、E 的土壤中 Ca 的含量明显高于其它林型。6 个林型土壤中 5 种营养元素的平均含量为: Fe > K > Ca > Na > Mg。变异系数的大小为: Ca > Mg > Fe > K > Na, 5 种营养元素的变化范围较大 (6% ~ 42%)。6 个林型中 Ca、Mg 的变异系数较大, Ca 的变异系数远高于其它元素, Fe、K、Na 的变异系数较小。土壤中除 Ca 元素外, 其余元素的变异系数均小于凋落叶和土壤中同种元素的变异系数, 说明土壤中营养元素含量对于凋落叶和土壤动物中营养元素含量来说是比较稳定的。

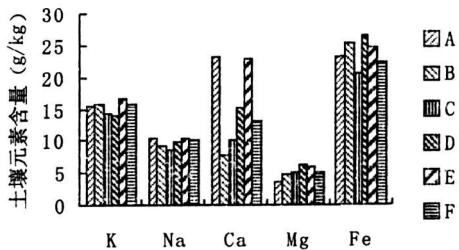


图 3 不同林型土壤营养元素含量
Fig 3 Nutrient elements of soil in different forest types

3 4 凋落物、土壤动物和土壤之间营养元素关系

凋落物-土壤动物-土壤系统中, 土壤动物和其它土壤生物的相互作用, 通过营养元素的周转, 调节养分的供应, 影响植物的生长及植物和土壤化学组成。从图 4 可以看出, 凋落叶和土壤中 K、Na 呈线性关系, Na 元素的线性拟合效果好于 K 元素, Ca、Mg、Fe 的判定系数 R^2 较小, 线性关系不明显, 说明凋落叶和土壤中 K、Na 的联系密切, Ca、Mg

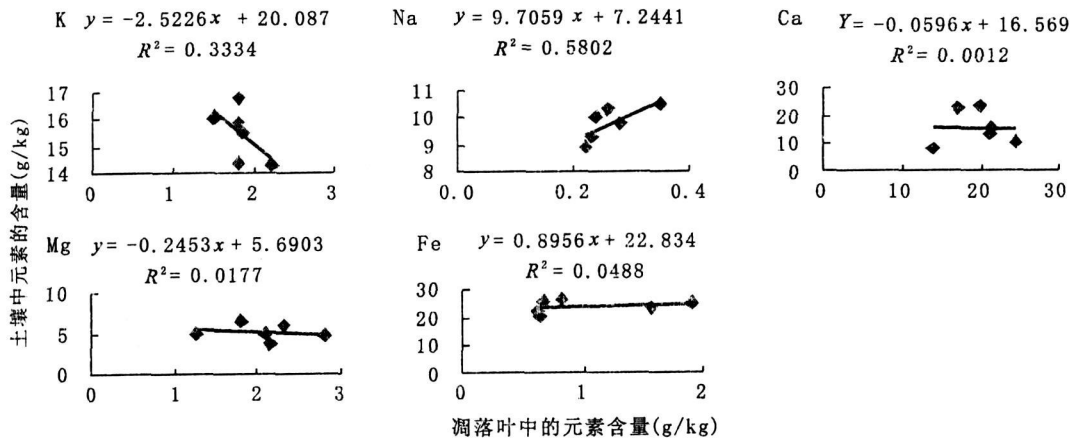


图 4 凋落物和土壤中营养元素的相关图

Fig 4 Correlativity of nutrient elements in litter and soil

Fe关系不密切。

土壤动物影响凋落物分解率,在凋落物分解过程中土壤动物也影响凋落物的化学成分的组成^[15~17],土壤动物体内营养元素含量与土壤、凋落物的营养元素含量均有一定联系。土壤中的营养元素对于凋落物和土壤动物中的营养元素来说是相对稳定的,因而把土壤中营养元素的含量作为因变量,凋落叶和土壤动物体内营养元素的含量作为自变量,进行多元线性回归(表2)。从表2可以看

出, K、Na、Fe的判定系数 R^2 较大,可以看出凋落叶和土壤中 K、Na、Fe对土壤动物体内 K、Na、Fe的含量的贡献率较大,凋落叶-土壤动物-土壤间 K、Na、Fe的含量存在线性关系。根据偏相系数可以判定,排除土壤动物体内营养元素的干扰后,土壤中的 Na与凋落叶中的 Na呈显著正相关,这与凋落物和土壤中 Na元素的曲线拟合结果一致,其余元素相关系数较小,不存在线性关系。

表 2 多元线性回归分析中的统计指标及回归方程

Table 2 The statistic index of multivariate regression and regression equation

元素	复相关系数	判定系数	偏相关系数		回归方程
	R	R^2	PC_1	PC_2	通式: $Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$
K	0.608	0.369	-0.541	0.232	$K_3 = 0.438 - 0.186K_1 + 0.055K_2$
Na	0.909	0.827	0.845	-0.766	$Na_3 = -0.018 + 0.053Na_1 - 0.018Na_2$
Ca	0.043	0.002	0.002	0.025	$Ca_3 = 1.909 + 0.002Ca_1 + 0.045Ca_2$
Mg	0.309	0.095	-0.039	0.281	$Mg_3 = 0.155 - 0.021Mg_1 + 0.209Mg_2$
Fe	0.862	0.744	0.356	0.855	$Fe_3 = -0.122 + 0.048Fe_1 + 0.152Fe_2$

3.5 土壤动物在凋落物和土壤之间营养循环中的作用

凋落叶的种类和分解时间的不同,土壤动物的作用也就不同, Kheirallah (1979)研究三种林型发现, *Leucaena* 的凋落物中 C/N 和 C/P 较低, N、P、K、Ca、Mg 浓度高, 该土壤中各种土壤动物数量最多, 生物量也最高^[18], 表明凋落物的营养元素含量影响土壤动物, 但是在热带地区沙性土壤中, 土壤湿度和结构的空变化对蚯蚓的影响大于凋落物的营养元素含量^[19]。可见, 凋落物的营养元素含量对土壤动物的影响并不是一直处于主导地位, 而

与其周围生境条件有关。用灰色关联分析土壤动物的密度、类群数和生物量与凋落叶、土壤中营养元素的关系(表3)。

由表3可见, 凋落叶中 K、Na、Ca 和土壤动物的生物量和类群数的灰色关联度较大, 土壤中 K、Na、Fe 与土壤动物类群数的灰色关联度较大, 凋落叶和土壤中营养元素与土壤动物的生物量、密度和类群数的平均关联度的顺序为: 类群数 > 生物量 > 密度, 说明凋落叶和土壤中营养元素的含量对土壤动物生物量、种类、密度有重要的影响, 相反土壤动物也必然会对凋落叶、土壤中的营养元素含量产生

表 3 土壤动物的生物量、密度、类群与凋落物和土壤中营养元素的灰色关联度

Table 3 The grey relevant coefficient of nutrient elements of litter soil with biomass density, group of soil fauna

	凋落叶			土壤		
	生物量	密度	类群数	生物量	密度	类群数
K	0.7471	0.7119	0.8651	0.7021	0.6571	0.8489
Na	0.7521	0.7048	0.8256	0.7145	0.6851	0.8458
Ca	0.7826	0.7217	0.8576	0.6357	0.5271	0.6788
Mg	0.6442	0.5931	0.7958	0.6823	0.6586	0.7615
Fe	0.6644	0.5703	0.6482	0.6977	0.6628	0.8395
平均值	0.718	0.6604	0.7984	0.6864	0.6382	0.795

影响, 土壤动物的密度、生物量、种类组成会影响土壤食物网的结构, 进而影响营养元素在凋落物和土壤间的周转率, 从而提高营养元素的利用率。土壤动物群落影响土壤生物过程、营养循环及结构, 可提高土壤肥力和森林生态系统的生产力^[20-21], 土壤动物在森林生态系统的养分循环转化过程中起着重要的作用。土壤动物的呼吸约占土壤呼吸的5%^[5], 土壤动物在土壤生物中所占的比重很小, 土壤动物体内存储的养分较少, 但它是复杂有机物分解的关键部分, 流经它的养分远大于其存储的能量, 土壤动物的活动影响了凋落物的分解速率, 土壤动物对凋落物分解中的间接影响要大于其直接作用。

4 结 论

凋落叶、土壤动物和土壤中营养元素 K、Na、Ca、Mg、Fe 的平均含量不同, 它们的变异程度也不同, 土壤营养元素的变异系数小于凋落叶和土壤动物体内营养元素的变异系数。

土壤与凋落叶营养元素之间的曲线拟合结果表明, K、Na 呈线性关系, Na 元素的拟合效果好于 K 元素, Ca、Mg、Fe 的判定系数 R^2 较小, 不存在线性关系。

凋落叶、土壤动物和土壤中营养元素的多元线性回归结果说明, 凋落叶和土壤中 K、Na、Fe 对土壤动物体内 K、Na、Fe 的含量的贡献率较大, 反映了凋落叶-土壤动物-土壤间 K、Na、Fe 联系密切, 根据偏相系数可以判定, 排除土壤动物体内营养元素的干扰后, 土壤中的 Na 与凋落叶中的 Na 呈显著正相关, 其余元素相关系数较小, 不存在线性关系。

凋落叶和土壤中营养元素与土壤动物的密度、类群数和生物量的平均关联度的顺序为: 类群数 >

生物量 > 密度, 说明凋落叶和土壤中营养元素的含量对土壤动物的密度、种类和生物量有重要的影响。同样, 土壤动物对凋落物、土壤中营养元素也产生影响, 土壤动物的密度、生物量、种类组成会影响土壤食物网的结构, 进而影响营养元素在凋落物和土壤间的周转率。因此, 土壤动物在森林生态系统的养分循环过程中起着重要作用。

参考文献:

[1] 陈吉泉, 李 博, 马志军, 等. 生态学家面临的挑战——问题与途径 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 40~ 67.

[2] 贺金生, 王政权, 方精云. 全球变化下的地下生态学: 问题与展望 [J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1226~ 1233.

[3] Hou W L, Zhang H. Ecological distribution of soil animals in broad-leaved and pine forests in southern slope of Xiaohang Mountains [J]. Chinese geographical science, 2000, 10(3): 276~ 281.

[4] Hou W L, Fang H. Ecological series of soil animals in Daxilidai Mountain [J]. Chinese geographical science, 2002, 12(4): 378~ 384.

[5] 李 博, 赵 斌, 彭容豪, 等 (译). 陆地生态系统生态学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 127~ 236.

[6] 李志安, 邹 碧, 丁永祯, 等. 森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77~ 83.

[7] Tian G, Adejuyigbe C O, Adeoye G O, et al. Role of soil macroarthropods in leaf decomposition and N release under various land-use practices in the humid tropics [J]. Pedobiologia, 1998, 42: 33~ 42.

[8] Ana P Pereira, Manuel A S Graca, Manuel Molles. Leaf litter decomposition in relation to litter physico-chemical properties, fungal biomass, arthropod colonization and geographical origin of plant species [J]. Pedobiologia, 1998, 42: 316~ 327.

[9] 梁文举, 闻大中. 土壤生物及其对土壤生态学发展的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 137~ 140.

[10] 殷秀琴, 邱丽阳, 杨令宾, 等. 森林凋落物-土壤动物-土壤系统中营养元素含量关系及分异 [J]. 地理研究, 2006, 25(2): 320~ 326.

[11] 殷秀琴, 吴东辉, 韩晓梅. 小兴安岭森林土壤动物群落多样性

研究[J]. 地理科学, 2003, 23(3): 316~ 322.

[12] 马建章, 刘传照, 张 鹏. 凉水自然保护区研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1993. 1~ 7

[13] Odum E. P. 生态学基础[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978. 358~ 369.

[14] 陈海燕, 刘新民, 孙卫国, 等. 大型土壤动物在沙漠生态系统物质循环中的作用研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 576~ 580

[15] 张雪萍, 张 毅, 侯威岭, 等. 小兴安岭针叶凋落物的分解与土壤动物的作用[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 552~ 556.

[16] Smith V C, Bradford M A. Litter quality impacts on grassland litter decomposition are differently dependent on soil fauna across time[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 24: 197~ 203

[17] Mark D Hunter, Sina Adl, Catherine M Pringle et al. Relative effects of macro invertebrates and habitat on the chemistry of litter during decomposition[J]. Pedobiologia, 2003, 47: 101~ 115.

[18] Kheiralkh A M. Behavioural preference of Julus scandinavicus (Myriapoda) to different species of leaf litter[J]. Oikos, 1979, 33: 466~ 471.

[19] Kang B T. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: Effects on soil fauna[J]. Soil Biol Biochem, 1993, 25(6): 731~ 737

[20] Gonzales G, Seastedt T R. Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests[J]. Ecology, 2001, 82: 955~ 964.

[21] 吴东辉, 张 柏, 陈 鹏. 长春市不同土地利用生境土壤甲虫群落结构特征[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 420~ 425.

Relationships of Nutrient Elements in Forest Ecosystem of Xiao H inggan Mountains and Role of Soil Fauna

Y IN X iu-Q in¹, LIU JiL iang¹, GAO M ing³

(1 College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024;
2 Department of Urban and Environmental Science, Liaodong College, Dandong, Liaoning 118003)

Abstract This paper studied the relationships of nutrient elements of litter, soil fauna and soil from six major forest types of Xiao H inggan Mountains. It was revealed that both the average content of elements and the variance from litter, soil fauna and soil in different forest types were not the same. The variance analyses (ANOVA) of nutrient elements from earthworm, enchytraeidae, centipede and other soil fauna showed that K, Ca, Mg and Fe had an influence on the growth of soil faunas. The significant linear relationship of K, Na and Fe with litter, soil fauna and soil indicated that these elements were closely related with litter, soil fauna and soil. Furthermore, the nutrient elements in leaf litter and soil were closely related to the biomass, density and group of soil fauna. The order of the average relevant coefficient was: group> biomass> density.

Key words soil fauna, litter, soil, nutrient element, Xiao H inggan Mountains