

DOI: 10.5846/stxb201711152040

王阳,王雪峰,张伟东.土壤线虫群落对森林凋落物分解主场效应的作用研究.生态学报,2018,38(21): - .

Wang Y, Wang X F, Zhang W D. Effect of soil nematode communities on the home-field advantage of forest litter decomposition. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

## 土壤线虫群落对森林凋落物分解主场效应的作用研究

王 阳<sup>1</sup>, 王雪峰<sup>2</sup>, 张伟东<sup>1,\*</sup>

1 辽宁师范大学生命科学学院, 大连 116081

2 吉林农业大学中药材学院, 长春 130118

**摘要:**以大连西郊国家森林公园作为样地,以黑松和辽东栎两种叶凋落物作为分解基质,采用两种不同网孔的凋落物袋法,从土壤线虫群落组成、凋落物分解速率、凋落物养分释放、土壤线虫群落多样性及其与凋落物理化指标的相关性等几个方面来探究森林凋落物分解的主场效应及土壤线虫群落的作用。结果表明:研究期间共鉴定出 4570 条土壤线虫,隶属于 35 个属。0.1mm 网袋中共鉴定 4407 条线虫,远高于 0.02mm 网袋的 163 条;而 0.02mm 网袋控制了土壤线虫参与凋落物分解,可视仅为由微生物参与分解过程。凋落物在主场与客场分解损失率差值(Ph-Pa、Qh-Qa)、元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)总体呈增加趋势,说明土壤线虫对主场凋落物分解作用明显。凋落物质量损失和 C、N 释放量表现为 0.1mm 网袋>0.02mm 网袋,主场>客场,主场与客场存在一定差异,表明土壤线虫促进了凋落物分解,且对主场凋落物分解贡献较大。主场线虫数量和种类较多,调控着微生物的群落结构及活动,进而加速了凋落物分解和养分释放,同时主场效应又决定着凋落物的分解速率和养分释放。研究结果可为今后森林凋落物分解的相关研究中主场效应、客场效应以及土壤生物驱动效应研究提供参考。

**关键词:**土壤生物驱动作用;主场效应;凋落物分解;养分释放;凋落物袋法

## Effect of soil nematode communities on the home-field advantage of forest litter decomposition

WANG Yang<sup>1</sup>, WANG Xuefeng<sup>2</sup>, ZHANG Weidong<sup>1,\*</sup>

1 School of Life Science, Liaoning Normal University, Dalian 116081, China

2 Collage of Chinese Medicine Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

**Abstract:** This study expounded the effect of soil nematode communities on the home-field advantage of the leaf litter decomposition of *Pinus thunbergii* Parl and *Quercus liaotungensis* Koidz, using litterbags with different mesh sizes in Dalian National Forest Park, China. We analyzed the soil nematode community composition, diversity and distribution, litter decomposition rate, and nutrient release. Furthermore, we studied a correlation between the number of nematodes, number of genera, ecological indices, and litter physico-chemical properties. The results showed that a total of 4570 nematodes belonging to 35 genera were collected. The number of nematodes collected in 0.1-mm litter bags (4407) was significantly more than that of the nematodes collected in 0.02-mm litter bags (163). Litter decomposition was driven by soil nematodes and microorganisms in the treatment with 0.1-mm litter bags. However, soil nematodes were controlled by 0.02-mm litter bags; therefore, soil nematodes were regarded as the only microorganisms involved in litter decomposition. An increase was observed in the difference of litter loss rate and element residual rate between home and away. It showed that soil nematodes had an obvious effect on the home-field litter decomposition. Litter mass loss rate and C、N release quantity in 0.1-mm litter bags were more than that in 0.02-mm litter bags. Litter mass loss rate and C、N release quantity in the home environment

基金项目:

收稿日期:2017-11-15; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangweidong64@aliyun.com

were more than that in the away environment. Some differences in the environment of home and away showed that soil nematodes promoted litter decomposition and significantly contributed to home-field. In the home environment, soil nematodes showed a high degree of community richness, regulated and controlled community structure and edaphon activity, and further accelerated litter decomposition and nutrient release. Meanwhile, the home-field advantage also determined litter decomposition rate and nutrient release. These results will provide a reference for the home-field and away-field advantage of litter decomposition and for the soil organism-driven effect on the forest litter decomposition in a related study in the future.

**Key Words:** soil organism-driven effect; home-field advantage; litter decomposition; nutrient release; litterbag technology.

森林凋落物主要有木本树种凋落的残枝败叶、皮、根等,是森林生态系统中养分送还土壤的重要组分。凋落物分解一般经历淋洗、粉碎、微生物降解等过程<sup>[1]</sup>,是森林生态系统中养分循环的重要环节,是目前生态学研究中的热点之一<sup>[2-3]</sup>。凋落物作为养分的主要来源,其分解的快慢决定着养分循环的规模程度,对维持森林生态系统的平衡和良性循环有重要意义。经研究发现,不同生境的森林凋落物在养分含量上有显著不同,且森林凋落物在其生长的栖息地(主场)比在其它生境(客场)分解更快,这种现象被称为凋落物分解的主场效应<sup>[4-6]</sup>。凋落物分解的主场效应由 Bocock 等<sup>[7]</sup>学者于 1960 年通过研究主场橡树(*Quercus palustris*)叶片分解较快提出的。而后 Ayres<sup>[8]</sup>于 2009 年提出关于叶凋落物分解的主场效应。Ayres 等<sup>[8]</sup>学者的研究表明,77%的凋落物分解试验表现为主场的分解速率高于在客场的分解速率,其中 34%的凋落物在主场的分解速率比在客场的分解速率高 10%以上。此后凋落物分解的主场效应开始引起了各国学者的高度关注,因为它可以更好的解释凋落物的分解过程及其影响因素。国外主要进行了主场效应控制凋落物的分解,主场效应强度及其调控因素的研究<sup>[8-9]</sup>。目前,国内对森林凋落物分解主场效应的研究很多,但对凋落物分解过程中主场效应的生物驱动机制的研究很少见刊。

土壤线虫是无脊椎后生动物,为土壤动物中优势类群,普遍存在于各类生境的土壤中<sup>[10-11]</sup>。土壤线虫营养类群和数量繁多,对不同生境反应敏感,可作为生态系统变化研究的指示生物<sup>[12]</sup>。土壤线虫在有有机质分解和养分矿化过程中占有极其重要的地位<sup>[13-15]</sup>。土壤线虫在碎屑食物网中占据多个营养级,作为其它土壤动物的代表,在物质和能量循环中发挥着关键作用<sup>[16]</sup>,其通过摄食和破碎凋落物直接调控凋落物分解。Bohan 等<sup>[17]</sup>2001 年研究发现,土壤动物(如线虫)可直接摄食凋落物,将凋落物碎片降解为简单无机物质,促进凋落物的分解。此外,土壤线虫通过取食微生物和排泄作用来改变微生物活性和群落结构,进而间接调控凋落物分解。例如 Niwa 等<sup>[18]</sup>2011 年研究发现,土壤食微线虫通过取食真菌和细菌来刺激微生物的活性进而改变地上部分养分循环和分配,加快凋落物分解。由此可见,土壤线虫对凋落物分解具有一定的作用,对研究森林凋落物分解的驱动因素具有重要意义。

本研究采用凋落物袋法,探究土壤线虫对凋落物分解速率和养分释放的影响,土壤线虫对主场效应的驱动及主场效应强度差异。旨在进一步完善对凋落物分解过程中土壤线虫群落作用及其变化的研究,为研究凋落物现存量、凋落物分解速率及营养循环提供借鉴,同时为温带地区针叶和阔叶凋落物分解主场效应的研究提供有益参考。

## 1 研究样区概况

本研究样区设置在辽宁省大连市甘井子区的西郊国家森林公园内,地处辽东半岛西南方向,该样区属于北半球的暖温带亚湿润季风气候,四季分明,有明显的海洋性气候特征。全年日照总时数为 2500—2800h,年平均气温 10℃左右,年降雨量 550—950mm。该区土壤水分条件良好,以典型的棕色土为主。所有山地均被乔木、灌木和草本覆盖,覆盖率可达 83.2%。其主要植被林有阔叶林、针叶林及针叶阔叶混交林 3 种类型。其中,针叶林主要树种有黑松、油松、槐树、卫矛和桑树等,阔叶林主要树种有辽东栎、麻栎、蒙古栎、栓皮栎、榆树、刺槐等,针阔混交林主要树种是各种栎树(辽东栎、麻栎、蒙古栎、栓皮栎)和松树(黑松、赤松、油松)。研

究地的位置、气候、土壤等条件均符合实验需求,所以本研究选取该地黑松林和辽东栎林两个典型植被林为样地,以黑松叶凋落物和辽东栎叶凋落物为分解物。

## 2 研究方法

### 2.1 样区设置

2014年11月,在辽东栎林和黑松林建立10m×20m的样地,分别在两个样地内设置4个3m×3m的样方,样方间留3m宽的保护带。于2014年11月收集样地内辽东栎、黑松叶凋落物,带回室内烘干并剪成小段备用,分别称其干重30.00g,装入两种不同的凋落物袋(大小10cm×30cm,孔径0.1mm和0.02mm)内并封口。依据样线法在8个3m×3m样方(2个重复)内分别布设1条样带,每条样带布设7个点,每个样点布设两种网袋各1袋,共112袋,形成了黑松叶凋落物-黑松林(主场,Ph)、黑松叶凋落物-辽东栎林(客场,Pa)、辽东栎叶凋落物-辽东栎林(主场,Qh)、辽东栎叶凋落物-黑松林(客场,Qa)4个处理水平,用金属钉将布置好的网袋固定在样地土壤表层,并在其上覆盖一层凋落物。

### 2.2 样品采集与土壤线虫的分离鉴定

2015年3月、2015年6月、2015年9月、2016年3月、2016年6月、2016年9月、2017年3月,在各样方的1条样带的每个样点上取回两种网袋各1袋,每次取样16袋,共7次,将其带回实验室,进行土壤线虫的分离鉴定。每袋凋落物经历淘洗-过筛-浅盘过程分离土壤线虫<sup>[19]</sup>,然后参考尹文英的《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[20]</sup>,在双目体视显微镜(Olympus C011)下鉴定,分类鉴定到属。依据土壤线虫头、食道、尾等部位特征、摄食习性以及在分解过程中的作用,将其分为食细菌类、食真菌类、植物寄生类和捕食-杂食类<sup>[21]</sup>四大功能类群。鉴定完毕,将与土壤线虫分离后的凋落物恒温烘干、称量、研磨粉碎、过筛、装瓶备用。

### 2.3 凋落物理化指标的测定

于2014年11月、2015年3月、2015年6月、2015年9月、2016年3月、2016年6月、2016年9月、2017年3月测定凋落物碳、氮、磷和钾元素含量。全碳含量采用重铬酸钾硫酸氧化法测定;全氮含量采用过氧化氢-硫酸消化法测定;全磷含量采用钼锑抗比色法测定;全钾含量采用四苯硼酸钠重量法测定。不同处理凋落物初始理化指标见表1。

表1 凋落物初始化学性质

Table 1 Chemical properties of original litter

凋落物 Litter	Ph	Pa	Qh	Qa	凋落物 Litter	Ph	Pa	Qh	Qa
C/(g/kg)	53.981a	53.953a	60.246b	60.204b	K/(g/kg)	3.702a	3.700a	4.261b	4.257b
N/(g/kg)	0.774a	0.773a	1.296b	1.293b	P/(g/kg)	0.743a	0.743a	0.787b	0.785b

Ph: 黑松叶凋落物—黑松林(主场) *Pinus thunbergii* Parl leaf litter—*Pinus thunbergii* Parl forest(home), Pa: 黑松叶凋落物—辽东栎林(客场) *Pinus thunbergii* Parl leaf litter—*Quercus liaotungensis* Koidz forest(away), Qh: 辽东栎叶凋落物—辽东栎林(主场) *Quercus liaotungensis* Koidz leaf litter—*Quercus liaotungensis* Koidz forest(home), Qa: 辽东栎叶凋落物—黑松林(客场) *Quercus liaotungensis* Koidz leaf litter—*Pinus thunbergii* Parl forest(away);不同小写字母表示主、客场间差异性显著( $P<0.05$ )

### 2.4 数据处理

#### (1) 土壤线虫多样性指数计算

Shannon-Wiener 多样性指数<sup>[22]</sup>( $H'$ )

$$H' = - \sum P_i \times \ln P_i$$

式中, $P_i = n_i/N$ , $n_i$ 为第*i*个类群的个体数, $N$ 为群落中所有类群的个体总数。

Pielou 均匀度指数<sup>[22]</sup>( $J$ )

$$J = H'/\ln S$$

式中, $S$ 为类群数

Simpson 优势度指数<sup>[22]</sup>( $D$ )

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

式中, $P_i$ 同上。

Margalef 丰富度指数<sup>[22]</sup>( $SR$ )

$$SR = (S-1)/\ln N$$

式中, $S$ 和 $N$ 同上。

线虫营养多样性指数( $TD$ )

$$TD = 1/\sum P_i^2$$

式中, $P_i$ 同上。

(2) 凋落物理化指标计算

凋落物残留率<sup>[23-24]</sup>( $R$ )

$$R(\%) = W_t/W_0 \times 100$$

式中, $W_0$ 为凋落物初始干重, $W_t$ 为获样时间 $t$ 时凋落物干重, $R$ 为凋落物残留率。

凋落物累积损失率( $L_c$ )

$$L_c(\%) = (W_0 - W_t) \times 100$$

式中, $L_c$ 为凋落物累积损失率, $W_0$ 和 $W_t$ 同上。

凋落物元素残留率( $E$ )

$$E(\%) = (W_t \times e_t) / (W_0 \times e_0) \times 100$$

式中, $E$ 为元素残留率, $e_0$ 为元素初始含量, $e_t$ 为获样 $t$ 时元素含量, $W_0$ 和 $W_t$ 同上。

(3) 数据统计、方差分析及表制作采用 Microsoft Excel 2010 软件进行,图制作采用 Origin7.5 软件进行, LSD 显著性分析和 Pearson 相关性分析采用 SPSS Statistics 17.0 软件进行。

### 3 结果与分析

#### 3.1 凋落物袋内的土壤线虫群落组成及多样性特征

研究期间,于凋落物袋内共鉴定 4570 条土壤线虫(表 2),隶属于线虫动物门 35 属。0.02mm 网袋中鉴定出 163 条线虫,而 0.1mm 网袋中鉴定出 4407 条线虫,其线虫总量显著高于 0.02mm 网袋内的线虫总量,这是由于 0.02mm 网袋只允许少数极小型的原生动物和土壤线虫进出<sup>[18]</sup>,控制了土壤线虫的进入。其中 Ph 处理(0.1mm 网袋)食细菌类线虫占 45.59%,植物寄生类线虫占 28.00%,Pa 处理(0.1mm 网袋)食细菌类线虫占 40.29%,植物寄生类线虫占 20.88%,且 Ph 处理(0.1mm 网袋)与 Pa 处理(0.1mm 网袋)食细菌类线虫数量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),Ph 处理(0.1mm 网袋)与 Pa 处理(0.1mm 网袋)植物寄生类线虫数量呈显著性差异( $P < 0.05$ )。Qh 处理(0.1mm 网袋)食细菌类线虫占 46.51%,植物寄生类线虫占 30.90%,Qa 处理(0.1mm 网袋)食细菌类线虫占 41.62%,植物寄生类线虫占 26.03%,且 Qh 处理(0.1mm 网袋)与 Qa 处理(0.1mm 网袋)食细菌类线虫数量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),Qh 处理(0.1mm 网袋)与 Qa 处理(0.1mm 网袋)植物寄生类线虫数量呈显著性差异( $P < 0.05$ )。可见食细菌类线虫和植物寄生类线虫为主要功能类群。

黑松凋落物袋(0.1mm 网袋)共捕获土壤线虫 1729 条,32 属。其中,Ph 处理(0.1mm 网袋)捕获线虫 1144 条,其优势属为针属、滑刃属、明杆属和头叶属,占 56.80%。Pa 处理(0.1mm 网袋)捕获线虫 585 条,其优势属有真滑刃属、滑刃属和明杆属,占 49.59%。辽东栎凋落物袋(0.1mm 网袋)共捕获线虫 2679 条,34 属。其中,Qh 处理(0.1mm 网袋)捕获线虫 1853 条,其优势属为针属、滑刃属、明杆属和头叶属,占 56.31%。Qa 处理(0.1mm 网袋)捕获线虫 826 条,其优势属有滑刃属、明杆属和头叶属,占 49.32%。由独立样本  $t$  检验可知,Ph 处理与 Pa 处理、Qh 处理与 Qa 处理的优势属数量存在显著性差异( $P < 0.05$ ),可见优势属对凋落物分解主场效应具有重要作用。

表 2 0.1mm 和 0.02mm 凋落物袋内土壤线虫群落组成/%

Table 2 Composition of soil nematode communities in 0.1 mm and 0.02 mm litter bags

线虫属 Genera of nematode	Ph		Pa		Qh		Qa	
	0.1mm	0.02mm	0.1mm	0.02mm	0.1mm	0.02mm	0.1mm	0.02mm
植物寄生类 Plant-parasites	28.00	0.94	20.88	1.63	30.90	1.25	26.03	2.29
丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	0.51	0.00	0.00	0.00	0.37	0.10	0.00	0.00
裸矛属 <i>Psilenchus</i>	0.51	0.00	0.16	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00
头垫刃属 <i>Tetylenchus</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.23	0.00
盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	1.19	0.00	1.96	0.00	2.41	0.00	2.41	0.00
短体长针属 <i>Longidorella</i>	0.60	0.00	0.16	0.00	0.73	0.00	0.57	0.00
齿杆属 <i>Odontorhabditis</i>	0.94	0.00	0.65	0.00	0.73	0.00	0.69	0.00
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	1.53	0.00	1.47	0.00	3.09	0.00	2.29	0.00
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	3.32	0.17	3.10	0.16	3.88	0.26	3.67	0.57
锥属 <i>Dolichorus</i>	4.17	0.17	3.43	0.33	3.51	0.31	2.98	0.57
针属 <i>Paratylenchus</i>	12.76	0.60	7.83	1.14	12.10	0.58	9.86	1.15
短体属 <i>Pratylenchus</i>	2.30	0.00	2.12	0.00	3.51	0.00	3.33	0.00
食真菌类 Fungivores	17.95	0.00	28.87	0.00	15.09	0.00	23.39	0.00
大矛属 <i>Enchodelun</i>	0.77	0.00	0.82	0.00	1.05	0.00	1.03	0.00
茎属 <i>Ditylenchus</i>	1.62	0.00	2.77	0.00	1.83	0.00	2.41	0.00
真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	5.70	0.00	10.11	0.00	2.67	0.00	4.01	0.00
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	9.86	0.00	15.17	0.00	9.53	0.00	15.94	0.00
食细菌类 Bacterivores	45.59	1.62	40.29	2.61	46.51	1.52	41.62	2.86
微咽属 <i>Microaimus</i>	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
伊龙属 <i>Ironus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.11	0.00
杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00
绕线属 <i>Plectus</i>	2.47	0.00	2.45	0.00	2.20	0.00	1.83	0.00
威尔斯属 <i>Wilsonama</i>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.11	0.00
丽突属 <i>Acrobeles</i>	2.98	0.34	1.63	0.49	2.93	0.26	1.26	0.46
中杆属 <i>Mesorhabdits</i>	0.26	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.23	0.00
微线属 <i>Micronema</i>	1.02	0.00	0.65	0.00	0.73	0.00	0.57	0.00
直头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2.38	0.00	2.28	0.00	3.09	0.00	2.18	0.00
盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	2.13	0.34	2.12	0.49	1.68	0.26	1.95	0.46
明杆属 <i>Rhabditophanes</i>	24.23	0.60	24.31	1.14	21.79	0.47	21.22	0.92
头叶属 <i>Cephalobus</i>	9.95	0.34	6.69	0.49	12.89	0.52	12.16	1.03
捕食-杂食类 Omnivore-predators	5.71	0.18	5.38	0.33	4.56	0.20	3.67	0.11
剑属 <i>Xiphinema</i>	0.17	0.09	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
* <i>Thonus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00
三孔属 <i>Tripyla</i>	0.09	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.11	0.00
* <i>Mylonchulus</i>	0.17	0.09	0.16	0.00	0.37	0.00	0.34	0.00
单齿属 <i>Mononchus</i>	0.26	0.00	0.16	0.00	0.31	0.00	0.46	0.11
螯属 <i>Pungentus</i>	0.00	0.00	0.98	0.00	0.42	0.10	0.00	0.00
穿咽属 <i>Nygolaimus</i>	2.47	0.00	2.45	0.00	1.57	0.10	1.15	0.00
孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	2.55	0.00	1.63	0.33	1.68	0.00	1.38	0.00
Total	97.24	2.73	95.42	4.57	97.05	2.97	94.71	5.26

\* :至今未查到其中文名

由表 3 可知,SR 指数、H' 指数、J 指数空间分布:Qh 处理>Qa 处理,Ph 处理>Pa 处理,而 TD 指数、D 指数为 Ph 处理<Pa 处理,Qh 处理<Qa 处理。Ph 处理与 Pa 处理的 TD 指数、H' 指数、D 指数、J 指数均呈显著性差异( $p<0.05$ ),Qh 处理与 Qa 处理的 TD 指数、SR 指数、H' 指数、J 指数均存在显著性差异( $P<0.05$ )。客场群落

多样性较主场低,可见客场凋落物内土壤线虫类群相对来说不丰富。

表 3 各样地土壤线虫群落多样性(0.1mm)

Table 3 Diversity of soil nematode communities in every plot (0.1mm)

土壤线虫指数 Soil nematodes indices	Ph(0.1mm)	Pa(0.1mm)	Qh(0.1mm)	Qa(0.1mm)
线虫属的数量 Number of nematode genera	30±4a	26±2a	34±4a	29±3a
线虫数量 Abundance of nematodes	1144±57ab	585±30b	1853±87a	826±42c
营养多样性指数 Trophic diversity index(TD)	2.33±0.28b	31.71±3.92a	1.91±0.17b	43.62±5.90a
丰富度指数 Richness index(SR)	4.12±0.74b	3.92±0.29b	4.39±0.67a	4.17±0.54b
多样性指数 Diversity index(H')	3.69±0.35a	1.61±0.15b	4.06±0.14a	1.50±0.15b
优势度指数 Dominance(D)	0.57±0.09bc	0.97±0.09a	0.48±0.09b	0.98±0.09ab
均匀度指数 Evenness index(J)	1.09±0.15a	0.49±0.07b	1.15±0.10a	0.44±0.04b

不同小写字母表示主、客场间差异性显著( $P<0.05$ )

### 3.2 凋落物分解速率特征分析

由图 1 可知,各处理凋落物的分解损失率呈现出相同的变化趋势,且同种凋落物累积损失率表现为 0.1mm 网袋>0.02mm 网袋,Qh 处理>Qa 处理,Ph 处理>Pa 处理,可见主场凋落物分解损失率较高,分解速度较客场快。除 2015 年 6 月和 9 月外,其余各月 Pa(0.1mm)与 Ph(0.1mm)处理累积损失率差异极显著( $P<0.01$ ),各分解阶段 Qa(0.1mm)与 Qh(0.1mm)处理累积损失率存在极显著性差异( $P<0.01$ )。

由图 2 可知,Ph 处理与 Pa 处理、Qh 处理与 Qa 处理凋落物分解损失率差值均呈正值,且凋落物损失率差值表现为 0.1mm 网袋>0.02mm 网袋。分解过程中,除 2015 年 3 月、2015 年 9 月外,其余各月 Ph-Pa(0.1mm)与 Ph-Pa(0.02mm)存在显著差异( $P<0.05$ )。除 2015 年 3 月、2015 年 6 月外,其余各月 Qh-Qa(0.1mm)与 Qh-Qa(0.02mm)差异显著( $P<0.05$ )。

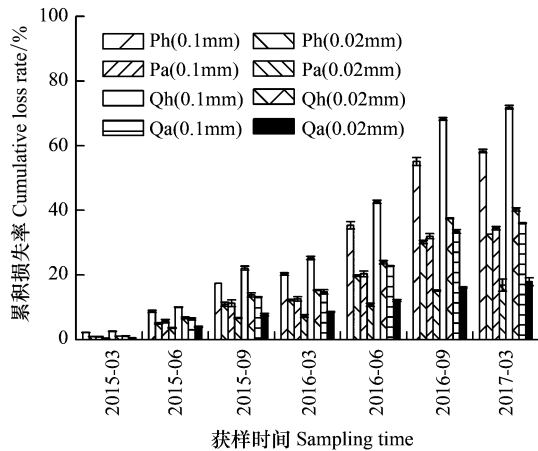


图 1 各样地凋落物分解速率

Fig.1 Litter decomposition rate in every plot

Ph, Pa, Qh, Qa:同上,不同小写字母表示主、客场间差异性显著( $P<0.05$ )

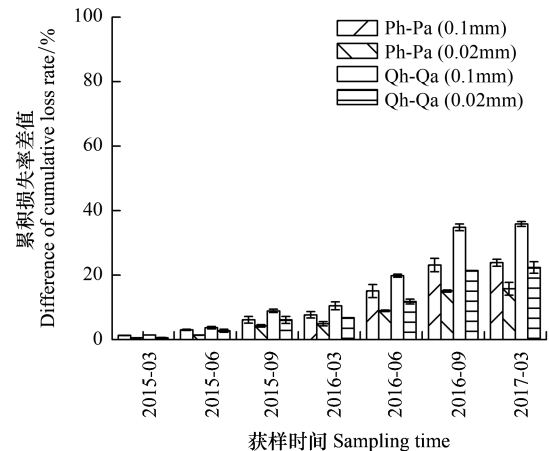


图 2 各样地凋落物分解速率差值

Fig.2 Difference of litter decomposition rate in every plot

### 3.3 凋落物养分释放特征分析

由图 3 可知,土壤生物的特化作用显著影响了凋落物分解过程中 C、N、P 元素养分释放,而对 K 元素释放影响不大。凋落物分解过程中 C、K 元素为直接释放,而 N、P 元素为先富集后释放<sup>[25]</sup>。同种凋落物 C、N、P、K 元素释放量均表现为 0.1mm 网袋>0.02mm 网袋,主场>客场。由独立样本 t 检验可知,在分解过程中,Pa(0.1mm)与 Pa(0.02mm)处理、Ph(0.1mm)与 Ph(0.02mm)处理、Qa(0.1mm)与 Qa(0.02mm)处理、Qh(0.1mm)与 Qh(0.02mm)处理、Pa(0.1mm)与 Ph(0.1mm)处理、Qa(0.1mm)与 Qh(0.1mm)处理 C 元素释放量

均存在极显著性差异( $P<0.01$ )。Pa(0.1mm)与 Ph(0.1mm)处理、Qa(0.1mm)与 Qh(0.1mm)处理 N 元素释放量均存在极显著性差异( $P<0.01$ )。Pa(0.1mm)与 Ph(0.1mm)处理 P 元素释放量均存在极显著性差异( $P<0.01$ ),而 Qa(0.1mm)与 Qh(0.1mm)处理 P 元素释放量呈显著性差异( $P<0.05$ )。由此可见土壤线虫不同程度驱动了主场效应,加速了凋落物养分释放。

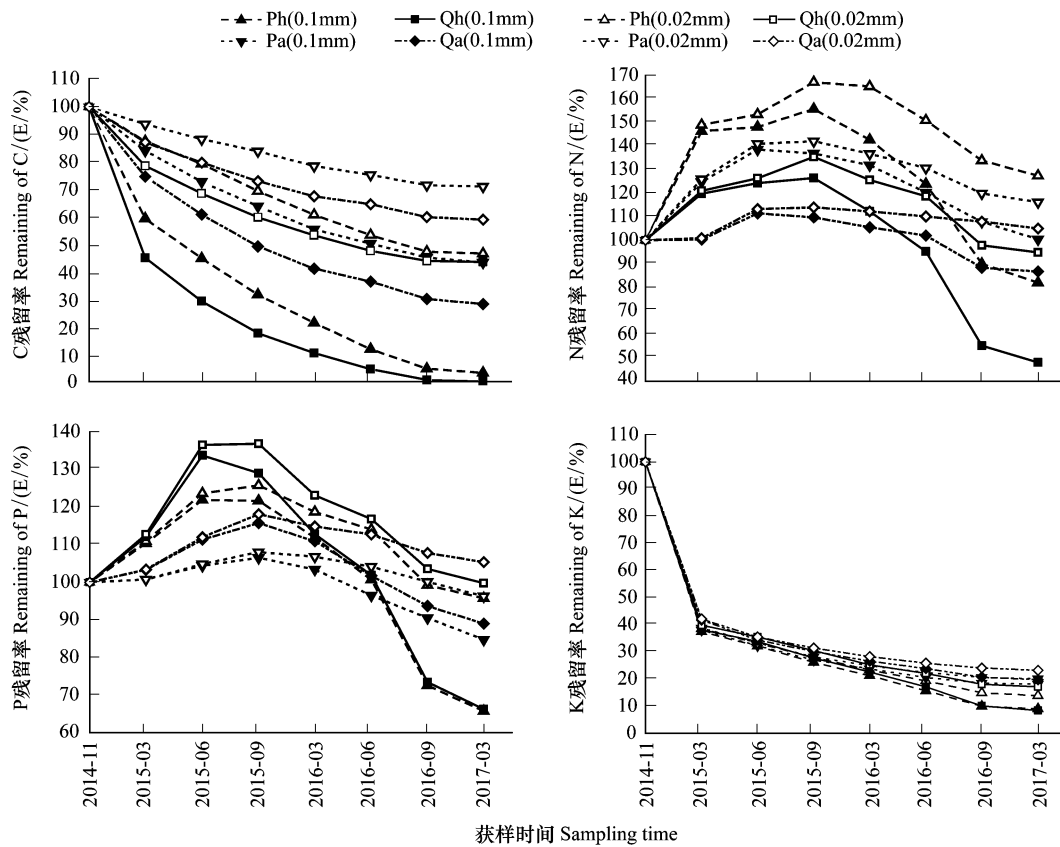


图3 各样地凋落物元素残留率

Fig.3 Dynamics of element remaining in every plot

由图 4 可知,Ph 处理与 Pa 处理、Qh 处理与 Qa 处理凋落物元素残留率差值随分解时间总体呈增大趋势,且 C、N、P、K 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)均表现为 0.1mm 网袋>0.02mm 网袋。在分解过程中,C、N、P 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)增加较快,而 K 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)波动较小,可见土壤线虫对主场 C、N、P 元素释放作用较为显著,而对 K 元素释放影响不大。各分解期间,C、K 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)均为正值,表现出正效应。分解前期,N、P 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)为负值,表现出负效应,分解中后期,N、P 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)为正值,表现出正效应。

### 3.4 土壤线虫群落特征与凋落物分解的相关性分析

由表 4 可知,不同分解时期的线虫个体总数、属数、营养多样性指数( $TD$ )、丰富度指数( $SR$ )、明杆属数量均与凋落物累积损失率显著正相关( $P<0.05$ );线虫个体总数、线虫属数、明杆属线虫数量、丰富度指数( $SR$ )分别与 C 残留率、K 残留率显著负相关( $P<0.05$ );线虫个体总数与 N 残留率、P 残留率显著负相关( $P<0.05$ );针属、头叶属线虫数量均与 N 残留率显著正相关( $P<0.05$ );明杆属线虫数量与 N 残留率显著负相关( $P<0.05$ );滑刃属线虫数量与 P 残留率、K 残留率显著正相关( $P<0.05$ )。上述结果反映了研究过程中土壤线虫群落对凋落物分解损失率以及理化性质动态的响应。

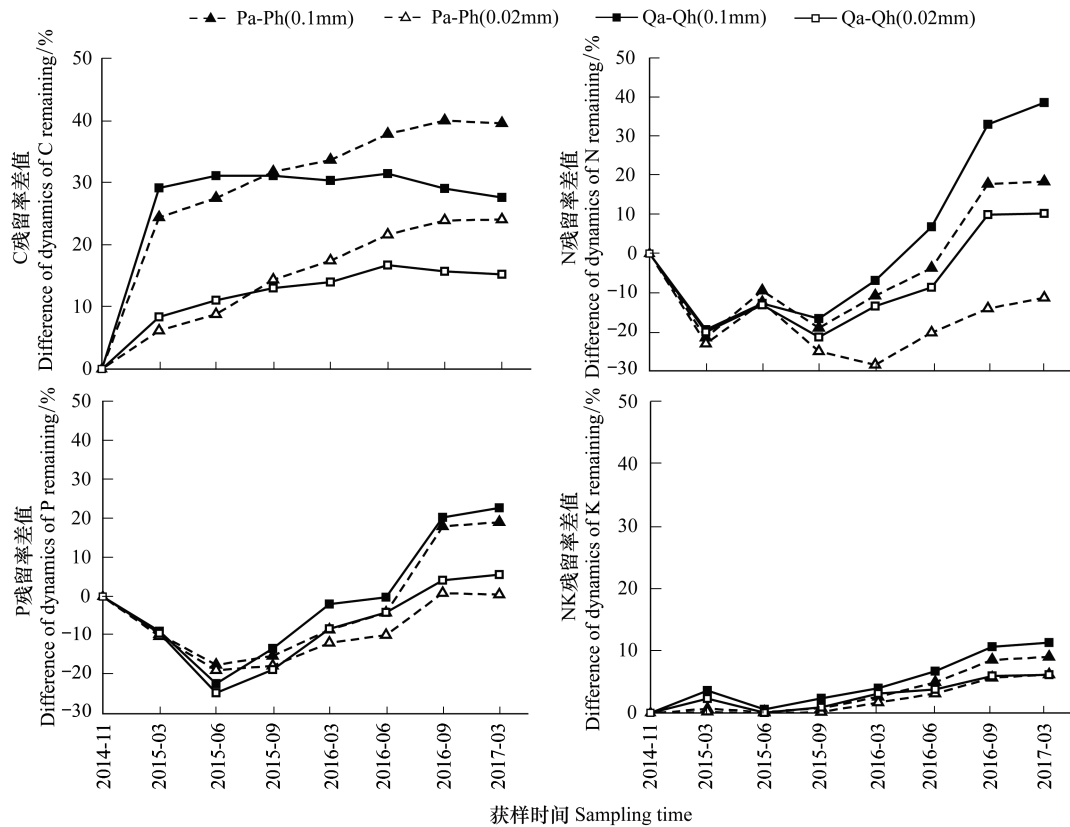


图4 各样地凋落物元素残留率差值

Fig.4 Difference of dynamics of element remaining in every plot

表4 线虫个体数、类群数、生态指数与凋落物理化指标的相关分析

Table 4 Correlation ( $r$ ) between the number of nematode number of genera ecological indices and litter physico-chemical properties

土壤线虫指数 Soil nematodes indices	累积损失率 Cumulative loss rate	C 残留率 Dynamics of C remaining	N 残留率 Dynamics of N remaining	P 残留率 Dynamics of P remaining	K 残留率 Dynamics of K remaining
线虫属数 Number of nematode genera	0.821 *	-0.887 **	-0.584	-0.540	-0.881 **
线虫数量 Abundance of nematodes	0.950 **	-0.857 *	-0.843 *	-0.796 *	-0.880 **
营养多样性指数 Trophic diversity index ( $TD$ )	0.793 *	-0.655	-0.734	-0.695	-0.683
丰富度指数 Richness index ( $SR$ )	0.763 *	-0.871 *	-0.503	-0.461	-0.857 *
多样性指数 Diversity index ( $H'$ )	0.345	-0.382	-0.149	0.098	-0.370
优势度指数 Dominance ( $D$ )	0.685	-0.522	-0.657	0.124	-0.562
均匀度指数 Evenness index ( $J$ )	-0.101	-0.108	0.187	0.223	0.115
优势属 Dominant genera					
针属 <i>Paratylenchus</i>	-0.579	0.319	0.760 *	0.752	0.369
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	-0.657	0.410	0.646	0.879 **	0.871 *
明杆属 <i>Rhabditophanes</i>	0.924 **	-0.895 **	-0.795 *	-0.752	-0.909 **
头叶属 <i>Cephalobus</i>	-0.492	0.192	0.764 *	0.747	0.253

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 

#### 4 讨论

本研究结果表明,凋落物中线虫种类、数量、多样性指数与凋落物累积损失率、C、N、P 和 K 的残留率有显著相关性,反映了土壤线虫对凋落物分解作用同时又受到凋落物的调节。主场与客场线虫的种类和数量在不



同分解时期存在显著差异,表明了土壤线虫对主场效应的驱动。Ayres 等<sup>[26]</sup>认为,除叶凋落物质量和环境等因素外,主场效应也是影响凋落物分解的重要因素,这一结论与本研究结果一致。森林凋落物分解的主场、客场效应差异可能是由于凋落物质量、土壤微生物多样性、林分的物种多样性、林下植被覆盖度等关键因素所致<sup>[27-29]</sup>。而主场效应又影响着凋落物的分解速率和养分元素释放。

凋落物分解过程中土壤线虫主要实现粉碎作用,使凋落物变小,利于微生物进行物质转化<sup>[30]</sup>。本研究 0.02mm 网袋内线虫数量极少,凋落物分解过程中,真菌和细菌为主要土壤生物,线虫作用受到很大限制,但 C、N、P 元素也有释放。而 0.1mm 网袋中线虫数量较多,其中食细菌类线虫和植食寄生类线虫占优势,与微生物共同驱动主、客场凋落物的分解。线虫通过摄食细菌和真菌来调控微生物的结构与分布,其消化后的排泄物 N 加速了养分流动,而排泄物粪粒为微生物提供更多生存空间,使微生物快速调整<sup>[31]</sup>,表明土壤生物在凋落物分解中发挥重要作用,促进了 N 元素释放。本研究发现,0.1mm 网袋中,主、客场的线虫优势属存在差异性,其中客场有 3 类优势属,主场有 4 类优势属,这主要与主、客场凋落物类型和土壤食物网结构有关,且主场优势属数量较多,说明其分布较广,对主场效应的作用明显。凋落物分解主场效应的驱动机制是土壤生物的特化作用<sup>[6]</sup>。Gholz 等<sup>[32]</sup>研究发现,客场凋落物种类有异于生境,土壤生物群落多样性较低,而主场土壤生物与生境凋落物相互适应,土壤生物丰富度较高,使主场不同土壤生物因吸收同一凋落物养分而发生竞争,造成土壤生物选择性对同生境叶凋落物分解特别有效,即土壤生物的特化作用,进而使凋落物在其生长的栖息地(主场)比在其它生境(客场)分解更快,发生主场效应。在不同样地的不同分解阶段,线虫的组成和活动变化体现了能量流动和物质循环的变化。本研究中主、客场之间凋落物 C、N、P、K 元素初始含量差异不显著,凋落物交互移置后,0.1mm 网袋中同种凋落物在主场损失率和 C、N、P 元素养分释放量均显著高于客场,且主场与客场之间呈一定程度的差异性( $P < 0.05$ ),而 K 元素养分释放量表现为主场略高于客场,由于主场线虫种类、数量、SR 指数、H' 指数、J 指数较客场高,表明主场线虫活动较频繁,调控了土壤微生物的分布及活性,使凋落物养分释放加快;而客场线虫多样性较低,导致凋落物养分释放较慢。由此说明土壤线虫对主场凋落物分解作用较强,其特化作用显著影响了凋落物的分解速率和养分循环。本研究同种凋落物的分解损失率差值(Ph-Pa、Qh-Qa)、元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)总体上均有增加,说明土壤线虫对凋落物分解主场效应驱动作用不断增大。凋落物分解前期,主场凋落物 N、P 元素富集较客场多,从而表现出负效应。

土壤生物组成差异越明显,表明凋落物质量差越大,主场效应强度差异越大<sup>[8]</sup>。本研究发现,C、N、P、K 元素残留率差值(Pa-Ph、Qa-Qh)均表现为 0.1mm 网袋 > 0.02mm 网袋,可见不同规格网袋内同种凋落物分解主场效应强度存在差异。0.02mm 网袋内可快速粉碎凋落物的线虫很少,凋落物分解主场效应主要是由微生物的特化作用引起的,微生物很容易降解凋落物中碳水有机化合物等易分解物质,但随着凋落物分解难度加大,微生物作用开始淡化,导致土壤微生物特化程度很低<sup>[1,33]</sup>。而 0.1mm 网袋中凋落物分解主场效应是由微生物和线虫共同驱动,凋落物质量较低是主场效应强度差异的主要条件之一,低质量凋落物中木质素、纤维素等不易被分解的物质含量较高,其分解时,微生物会破碎其表皮,使线虫进入内部并摄食,导致凋落物碎片化,进而促进微生物进一步分解,使凋落物内复杂的有机物转化为简单的无机小分子<sup>[31]</sup>,土壤生物特化程度会增大。因此,0.1mm 网袋内凋落物具有更强的主场效应。此外,土壤生物的组成和分布通常与土壤温度、湿度、构成及外界环境变化密切联系<sup>[34-35]</sup>。土壤生物的特化作用和快速调整均需要适宜的光照、温度和水含量。研究发现,6 月和 9 月水热条件优于 3 月,适于土壤生物生存,而主场线虫与土壤结构、环境相宜,导致主场线虫群落多样性高,更利于其驱动凋落物分解的主场效应。3 月寒冷、缺水 and 荫蔽的环境在一定程度上都减弱土壤生物对凋落物的矿化速率,进而弱化主场效应,甚至使主场效应强度产生负值。

#### 参考文献 (References):

- [1] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 薛璟花. 氮沉降下鼎湖山森林凋落物分解及与土壤动物的关系. 生态环境, 2005, 14(6): 901-907.
- [2] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: revisiting litter feedbacks. Trends in Ecology & Evolution, 2015, 30(6): 357-363.
- [3] Purahong W, Kapturska D, Pecyna M J, Schulz E, Schloter M, Buscot F, Hofrichter M, Krüger D. Influence of different forest system

- management practices on leaf litter decomposition rates, nutrient dynamics and the activity of ligninolytic enzymes; a case study from central European forests. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93700.
- [ 4 ] Vivanco L, Austin A T. Tree species identity alters forest litter decomposition through long-term plant and soil interactions in Patagonia, Argentina. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 727-736.
- [ 5 ] 立天宇, 康峰峰, 韩海荣, 高晶, 宋小帅, 于舒. 冀北辽河源自然保护区土壤微生物碳代谢特征对凋落物分解主场效应的响应. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2159-2166.
- [ 6 ] 查同刚, 张志强, 孙阁, 王高敏, 负小琴, 王伊琨, 刘艳. 凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动. *生态学报*, 2012, 32(24): 7991-8000.
- [ 7 ] Bockock K L, Gilbert O, Capstick C K, Twinn D C, Waid J S, Woodman M J. Changes in leaf litter when placed on the surface of soils with contrasting humus types: I. Losses in dry weight of oak and ash leaf litter. *Journal of Soil Science*, 1960, 11(1): 1-9.
- [ 8 ] Ayres E, Steltzer H, Simmons B L, Simpson R T, Steinweg J M, Wallenstein M D, Mellor N, Parton W J, Moore J C, Wall D H. Home-field advantage accelerates leaf litter decomposition in forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 606-610.
- [ 9 ] Veen G F, Freschet G T, Ordonez A, Wardle D A. Litter quality and environmental controls of home-field advantage effects on litter decomposition. *Oikos*, 2015, 124(2): 187-195.
- [ 10 ] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210.
- [ 11 ] 张伟东, 尚艳芳, 王雪峰. 土壤线虫群落对大连石门山森林植被恢复的响应. *生态学报*, 2010, 30(4): 878-886.
- [ 12 ] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 陈家宽. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1541-1546.
- [ 13 ] 刘静, 孙涛, 程云云, 王清奎. 氮沉降和土壤线虫对落叶松人工林土壤有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(8): 2085-2093.
- [ 14 ] 吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽. 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响. *生物多样性*, 2007, 15(2): 124-133.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19.
- [ 17 ] Cragg R C, Bardgett R D. How changes in soil faunal diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2073-2081.
- [ 18 ] Niwa S, Mariani L, Kaneko N, Okada H, Sakamoto K. Early-stage impacts of sika deer on structure and function of the soil microbial food webs in a temperate forest: a large-scale experiment. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3): 391-399.
- [ 19 ] 谢辉. 植物线虫分类学. 北京: 高等教育出版社, 2005: 40.
- [ 20 ] 尹文英, 胡圣豪, 沈温芬. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 51-89, 437-475.
- [ 21 ] 梁文举, 姜勇, 李琪, 陈利军, 曲业兵. 施用化肥对下辽河平原稻田土壤线虫群落产生的影响. *土壤通报*, 2004, 35(6): 773-775.
- [ 22 ] 王邵军, 蔡秋锦, 阮宏华. 土壤线虫群落对闽北森林植被恢复的响应. *生物多样性*, 2007, 15(4): 356-364.
- [ 23 ] 殷秀琴. 东北森林土壤动物研究. 长春: 东北师范大学出版社, 2001: 23-57.
- [ 24 ] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原生态系统的分解者与枯枝落叶分解的研究. *草业学报*, 1994, 3(1): 13-17.
- [ 25 ] 侯玲玲, 孙涛, 毛子军, 吕海亮, 赵娟, 宋元. 小兴安岭不同林龄天然次生白桦林凋落物分解及养分变化. *植物研究*, 2012, 32(4): 492-496.
- [ 26 ] Ayres E, Steltzer H, Berg S, Wall D H. Soil biota accelerate decomposition in high-elevation forests by specializing in the breakdown of litter produced by the plant species above them. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 901-912.
- [ 27 ] Berger T W, Berger P. Does mixing of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) litter hasten decomposition? *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 217-234.
- [ 28 ] Araujo P I, Yahdjian L, Austin A T. Do soil organisms affect aboveground litter decomposition in the semiarid Patagonian steppe, Argentina? *Oecologia*, 2012, 168(1): 221-230.
- [ 29 ] Butenschoen O, Scheu S, Eisenhauer N. Interactive effects of warming, soil humidity and plant diversity on litter decomposition and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1902-1907.
- [ 30 ] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, Lavelle P. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: influence of litter quality. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 247-252.
- [ 31 ] Berg B, Davey M P, De Marco A, Emmett B, Faituri M, Hobbie S E, Johansson M B, Liu C, McLaugherty C, Norell L, Rutigliano F A, Vesterdal L, De Vizio S A. Factors influencing limit values for pine needle litter decomposition: a synthesis for boreal and temperate pine forest systems. *Biogeochemistry*, 2010, 100(1/3): 57-73.
- [ 32 ] Gholz H L, Wedin D A, Smitherman S M, Harmon M E, Parton W J. Long-term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: toward a global model of decomposition. *Global Change Biology*, 2000, 6(7): 751-765.
- [ 33 ] Giebelmann U C, Martins K G, Brändle M, Schädler M, Marques R, Brandl R. Lack of home-field advantage in the decomposition of leaf litter in the Atlantic rainforest of Brazil. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49: 5-10.
- [ 34 ] 刘银银, 孙庆业, 李峰, 谢永宏. 洞庭湖典型湿地植被群落土壤微生物特征. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1233-1237.
- [ 35 ] 薛会英, 罗大庆, 于宝政. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林土壤线虫群落特征. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3402-3408.