

中小型土壤动物对川西高山草甸 枯落物分解的季节响应*

和润莲 陈亚梅 邓长春 杨万勤 张健 刘洋**

四川农业大学生态林业研究所, 长江上游生态安全协同创新中心, 高山森林生态系统定位研究站, 长江上游林业生态工程重点实验室 成都 611130

摘要 中小型土壤动物是土壤生态系统重要组成部分. 为了解川西高山草甸不同草本植物枯落物中土壤动物季节动态, 利用凋落物网袋法, 于雪被末期(5月初)和生长季末期(11月初)对6种草本植物残体中的中小型土壤动物群落进行了调查. 结果显示, 干漏斗(Tullgren)法共分离到中小型土壤动物871只, 隶属1门4纲9目27类(科). 雪被末期获得562只, 隶属1门4纲7目14类群, 其中以矮蒲螨科和美绥螨科为优势类群; 生长季末期共获得309只, 隶属1门4纲9目19类群, 其中以丽甲螨科和舟蛾科为优势类群. 川西高山草甸枯落物分解的中小型土壤动物群落结构具有显著的季节特征, 多样性和类群数受季节变化的影响显著($P < 0.05$), 且常见类群和稀有类群均发生明显变化. 禾本类和阔叶杂草两类植物功能群的土壤动物群落多样性无显著差异($P > 0.05$). 两个季节草本植物残体中土壤动物群落Sorensen相似性系数均低于0.5. 草本各物种组成对土壤动物群落多样性的影响不显著($P > 0.05$). 以上研究结果表明, 川西高山草甸生态系统中, 季节交替引起的环境因子变化, 特别是日均温和枯落物含水量是影响中小型土壤动物群落结构的主要因素. 图4 表5 参35

关键词 中小型土壤动物; 高山草甸; 草本植物; 枯落物分解

CLC Q958.1 : S154.5

Seasonal responses of the soil meso- and microfauna to litter decomposition in alpine meadow of western Sichuan*

HE Runlian, CHEN Yamei, DENG Changchun, YANG Wanqin, ZHANG Jian & LIU Yang**

Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Long-term Research Station of Alpine Forest Ecosystems, Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering in Sichuan Province, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract Soil meso- and microfauna are an important part of the soil ecosystem. In order to understand the seasonal dynamics of soil fauna in litters in the alpine meadow of western Sichuan on the Eastern Tibetan Plateau, a field experiment using litterbags was conducted to investigate soil meso- and microfauna in 6 kinds of herbaceous plants at the end of snowing season and the growing season. A total of 871 individuals of soil meso- and microfauna were collected, belonging to 1 phylum, 5 classes, 10 orders and 19 families. Among them 562 individuals of soil meso- and microfauna were collected at the end of snowing season, belonging to 1 phylum, 4 classes, 7 orders and 14 families, with *Pygmephoridae* and *Ameroseiidae* as dominant groups. At the end of growing season, 309 individuals of soil meso- and microfauna were collected, belonging to 1 phylum, 4 classes, 9 orders and 19 families, *Liacaridae* and *Notodontidae* being the dominant groups. The result showed significant seasonal variation of the taxonomic composition and diversity of soil meso- and microfauna communities in litter decomposition of the western Sichuan alpine meadow ecosystem ($P < 0.05$), with obvious changes in common groups and rare groups. Soil meso- and microfauna community diversity of grasses and broad-leaved weeds showed no significant difference ($P > 0.05$). Sorensen similarity coefficients of soil animal community in two seasons were below 0.5 in the herbaceous plant litter. Herbaceous species composition did not show significant influence on soil meso- and microfauna community diversity ($P > 0.05$). The results showed that the environmental factors caused by seasonal changes, especially the average daily temperature and the water content of litters, are the main influencing factors for soil meso- and microfauna community structure in the alpine

收稿日期 Received: 2014-08-04 接受日期 Accepted: 2014-10-01

*国家自然科学基金项目(31200345)、国家科技支撑计划课题(2011BAC09B05)、教育部博士点基金项目(20115103120003)、四川省教育厅重点项目(11ZA079)和四川省科技厅应用基础项目(2012JY0047)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31200345), the National Science and Technology Support Plan (2011BAC09B05), the Doctoral Program Foundation of the Ministry of Education of China (20115103120003), the Key Projects of Sichuan Provincial Education Department (11ZA079), the Applied Basic Research Program of Sichuan Provincial Science and Technology Department (2012JY0047)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: sicauliuyang@163.com)

meadow ecosystem of western Sichuan.

Keywords meso- and microfauna; alpine meadow; herbaceous plant; litter decomposition

土壤动物是土壤生态系统的重要组成部分,在物质循环和能量流动中起着重要促进作用^[1-2].它既是消费者又是分解者,通过其自身的活动担负着分解有机质、改变土壤理化性质的作用.土壤动物群落受海拔梯度^[3]、气候条件^[4]、植被类型^[5]、土壤理化性质^[6]等生态因子的影响.土壤动物不仅可以促进草甸生态系统的次生演替,对于增加群落的植物多样性也有不可忽视的作用^[7-9].中小型土壤动物是高山草甸分解者的主要类群,其中,以前气门亚目、甲螨亚目和弹尾目为优势类群^[10-12].中小型土壤动物通过复杂的交互作用方式直接或间接影响凋落物分解和营养物质循环过程^[8],一方面,通过粉碎、采食枯落物直接参与枯落物分解;另一方面,通过改变周围的物理、化学和生物性质间接影响枯落物分解.前期研究表明,川西高山草甸土壤动物群落在生态系统物质循环中的作用要高于我国北方草地生态系统中的土壤动物群落^[10],且土壤动物群落结构具有明显的季节特征^[10-12].如吴鹏飞发现土壤动物的群落结构在冬春两季有较大差异,但类群数和个体数在冬春两季间无显著变化^[10],张洪芝等发现若尔盖高寒草甸弹尾目、弹尾目和双翅目幼虫等的密度及多样性指数均有显著的季节差异^[11].土壤动物不仅在生长季参与凋落物的分解活动,在冬季雪被期仍调控着凋落物分解的生态过程^[13-15].例如谭波等发现长角毛蚊科幼虫、大蚊科幼虫和苔甲科等在冬季仍具有较高的活性^[15],这些土壤动物功能类群可能对维持冬季的凋落物分解和碳氮矿化过程具有重要意义.

植物和分解者(土壤动物)之间有着密切的联系,土壤动物的功能类群和土壤动物群落组成变化是生态系统功能的重要驱动因子,植物功能类群的差异可能引起该群落土壤动物类群和组成的变化^[16-17].然而,不同类群的土壤动物可能对草本植物的喜好不同,例如,宋博发现松嫩平原羊草草甸5种凋落物分解的土壤动物数量由大到小依次分别为虎尾草、羊草、拂子茅、碱茅和碱地肤凋落物^[17],王星雨等研究发现禾草枯落物分解过程中中小型土壤动物起到最为显著的促进作用^[18],然而,中小型土壤动物对其他草本植物的分解是

否也具有相同的作用尚不清楚.川西高山草甸草本植物种类丰富,但不同物种或者植物功能群枯落物分解过程中土壤动物多样性、类群和数量有没有差异,不同季节有何变化,目前还缺乏相关的研究.因此,本研究以川西高寒草甸两类典型的草本植物(禾本类和阔叶杂草)枯落物为分解基质,研究中小型土壤动物的多样性及其对季节变化的响应,旨在为深入了解高山草甸的物质循环规律以及深入理解植物与分解者之间的关系提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族、羌族自治州理县米亚罗鹧鸪山(31°50'-31°53'E, 102°40'-102°44'N)处于青藏高原东缘褶皱带最外缘部分,岷江上游支流杂谷脑河上游地区.鹧鸪山山体海拔3 200-4 800 m,山地垂直地带性明显,自河谷至山顶依次分布的植被类型有针阔混交林、暗针叶林、高山疏林灌丛、高山草甸,4 500 m以上为高山荒漠和积雪带.气候属于冬寒夏凉的高寒气候,年平均气温6-12℃,1月平均气温-8℃,7月平均气温12.6℃,年积温1 200-1 400℃,年降水量600-1 100 mm,年蒸发量1 000-1 900 mm.2012年10月底到2013年11月初一年的日均温变化情况如图1.由图1知,12年10月底到13年4月底,日均温基本上在0℃以下,且温度变化波动较大,从5月份开始逐渐回温,6月份达到峰值,7月份的日均温保持较高.地形以石质山地为主,土壤具有粗骨、石砾含量高和薄层等特征.从低海拔到高海拔,土壤类型依次为山地暗棕壤、棕色针叶林土、高山草甸土.主要草本植物有冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、圆叶筋骨草(*Ajuga ovalifolia*)、糙野青茅(*Deyeuxia scabrescens*)、圆穗蓼(*Polygonum sphaerostachum*)、藏羊茅(*Festuca wallichanica*)、草血竭(*Polygonum paleaceum*)、肾叶龙胆(*Gentiana crassuloides*)和草甸马先蒿(*P.roylei*)等.每年从4-10月为生长季节,冬季雪被期明显,从10月到次年4月,长达6-7个月.

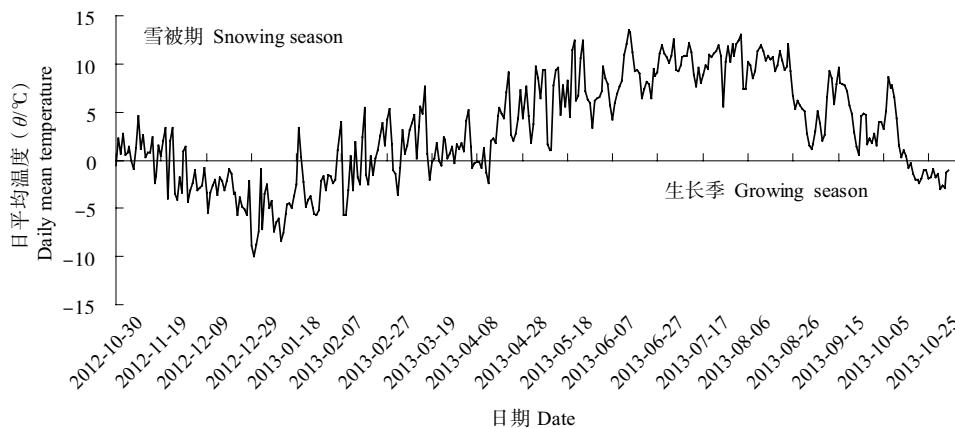


图1 一年高山草甸枯落物分解的日平均温度动态.

Fig. 1 Annual dynamics of daily mean temperature of the alpine meadow.

表1 雪被期和生长季节的环境因子
Table 1 Environmental factors in the snowing season and growing season

环境因子 Factor	平均温度 Average temperature (θ/°C)	雪被厚度 Snow thickness (δ/cm)	冻融循环次数 Frequency of freeze-thaw cycle (N)	正积温 Positive accumulated temperature (θ/°C)	负积温 Negative accumulated temperature (θ/°C)
雪被期 Snowing season	-0.58	1.14	327	217.5	-322.94
生长季节 Growing season	6.85	0	0	1347.56	-31.44

1.2 研究方法

1.2.1 枯落物的收集与埋设 2012年10月在鹧鸪山高山灌丛草甸采集优势草本植物的枯落物,包括藏羊茅、糙野青、冷地早熟禾、圆叶筋骨草、草甸马先蒿和草血竭6种植物,带回室内将其风干,每个物种称取10 g装入20 cm×20 cm(孔径为1 mm)的分解袋中,每个物种称取6袋,共36个凋落袋.10月底将凋落物袋平铺埋设在海拔4 200 m的高山草甸地表并用钉子固定位置.同时随机选取一个凋落袋,袋内埋设一个纽扣式温度记录仪(iButton DS1923-F5, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, CA, USA),设定为每3 h记录一次温度数据,计算冻融频次.同时,在放置凋落袋的附近用15竹竿插入土壤中,用作雪被厚度测定的标记,在雪被期每月观测记录雪被的厚度情况.一年的平均温度、雪被厚度、冻融频次、正积温、负积温如表1所示.

2013年5月1日和2013年11月4号分别代表雪被期末和生长季末,分别采集每个处理的枯落物分解袋各3袋,将所采的分解袋装入密封而透气的黑布袋里面低温保存,迅速带回室内,先将袋外的泥土枯落物轻轻去除,然后将袋内的枯落物放置于改良的Tullgren干漏斗中分离提取中小型土壤动物,采用体式解剖镜和生物显微镜镜检计数和分类,并参照《中国土壤动物检索图鉴》鉴定到科^[19].分离结束后,清除枯落物表面的土壤颗粒和混入的杂物,60℃下烘干至恒重,称量枯落物干重.

1.3 数据处理

(1) 土壤动物群落多样性:

Shannon-Wiener多样性指数: $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Simpson优势度指数: $C = \sum (P_i)^2$

Pielou均匀度指数: $J = H'/\ln S$

Margalef丰富度指数: $D = (S - 1)/\ln N$

式中, n_i 为第*i*个物种的个体数量, S 为类群数, N 为土壤动物总个体数, P_i 为第*i*类群的百分比.

(2) 群落相似性分析:

Sorenson指数: $C_s = 2j / (a + b)$

式中, j 为两个群落共有的类群数, a 和 b 分别为群落A和群落B的类群数. $0 < S < 0.25$ 为极不相似, $0.25 \leq S < 0.5$ 为中等不相似, $0.5 \leq S < 0.75$ 为中等相似, $0.75 \leq S < 1.0$ 为极为相似.

土壤动物多度的划分: 个体数量占群落总个体数10.00%以上者为优势类群(+++), 占1.00%-10.00%者为常见类群(++), 不足1.00%者为稀有^[11].

数据统计与分析采用SPSS17.0和 Excel软件完成, 土壤动物群落结构特征采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)多重比较, 雪被末期和生长季末期两种类型草本植物残体土壤动物多样性的差异性采用独立样本*T*检验, 土壤动物群落结构特征和环境因子的相关性采用Pearson相关分析, 显著性水平设定为 $P = 0.05$. 枯落物物种和季节对土壤动物多样性的影响采用双因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 中小型土壤动物群落结构

2次采样枯落物中共采集到中小型土壤动物871只, 隶属11门4纲9目27类(表2), 雪被末期和生长季末期高山草甸枯落物中获得的中小型土壤动物群落结构有所变化. 雪被末期6种枯落物中共获得中小型土壤动物14类, 562只, 占一年采集数的64.52%, 其中以矮蒲螨科和美绥螨科为优势类群, 分别占总数的64.77%和30.43%, 大赤螨科为常见类群(1.25%). 生长季末期6种枯落物中共获得中小型土壤动物19类, 309只, 占一年采集数的35.48%, 其中以丽甲螨科和舟蛾科为优势类群, 分别占41.10%和17.48%, 常见类群包括棘跳科、疣跳科、

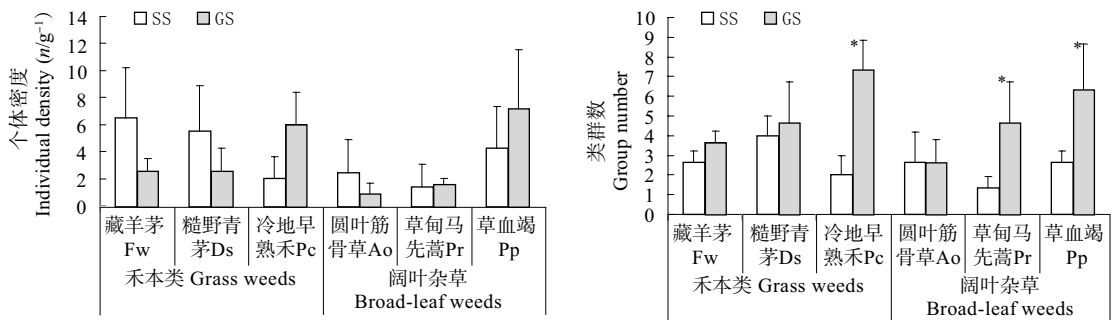


图2 土壤动物个体密度和类群数(平均值±标准误). *表示季节间差异显著($P < 0.05$). SS: 雪被末期; GS: 生长季末期.
Fig. 2 Individual density and group number of soil fauna. Values are mean ± SE; * indicates significant difference ($P < 0.05$). SS: Snowing season; GS: Growing season; Fw: *Festuca wallichanica*; Ds: *Deyeuxia scabrescens*; Pc: *Poa crymophila*; Ao: *Ajuga ovalifolia*; Pr: *P. roylei*; Pp: *Polygonum paleaceum*.

表2 高山草甸两个季节中小型土壤动物群落的种类和数量组成
Table 2 Groups and composition of the soil meso- and microfauna community in the meadow ecosystem in different seasons

土壤动物类群 Soil fauna group	雪被末期 Snowing season			生长季末期 Growing season			合计 Total		
	个体数 Individual number	百分比 Percent (P%)	优势度 Abundance	个体数 Individual number	百分比 Percent (P%)	优势度 Abundance	个体数 Individual number	百分比 Percent (P%)	优势度 Abundance
弹尾目 Collembola	1	0.18	+	24	7.77	++	25	2.87	++
	2	0.36	+	3	0.97	+	5	0.57	+
	4	0.71	+				4	0.46	+
前气门亚目 Prostigmata				17	5.50	++	17	1.95	++
				4	1.29	++	4	0.46	+
				5	1.62	++	5	0.57	+
				13	4.21	++	13	1.49	++
				1	0.32	+	1	0.11	+
	2	0.36	+	2	0.65	+	4	0.46	+
	364	64.77	+++				364	41.79	+++
	3	0.53	+				3	0.34	+
	7	1.25	++				7	0.80	+
	171	30.43	+++	30	9.71	++	201	23.08	+++
中气门亚目 Mesostigmata				7	2.27	++	7	0.80	+
	2	0.36	+				2	0.23	+
	1	0.18	+	127	41.10	+++	128	14.70	+++
				2	0.65	+	2	0.23	+
	2	0.36	+	10	3.24	++	12	1.38	++
				3	0.97	+	3	0.34	+
				1	0.32	+	1	0.11	+
				54	17.48	+++	54	6.20	++
	1	0.18	+	4	1.29	++	4	0.46	+
							1	0.11	+
							1	0.11	+
				1	0.32	+	1	0.11	+
				1	0.32	+	1	0.11	+
	1	0.18	+				1	0.11	+
	1	0.18	+				1	0.11	+
合计 Total	562	100		309	100		871	100	
类群数 Number of groups	14			19			27		

+++：优势类群（个体数量占群落总个体数10.00%以上）；++：常见类群（个体数量占群落总个体数1.00%-10.00%）；+：稀有类群（个体数量占群落总个体数不足1.00%）。

+++：Dominant group (Average density accounting for more than 10% of the total); ++: Frequent group (Average density accounting for 1-10% of the total); +: Rare group (Average density accounting for less than 1% of the total).

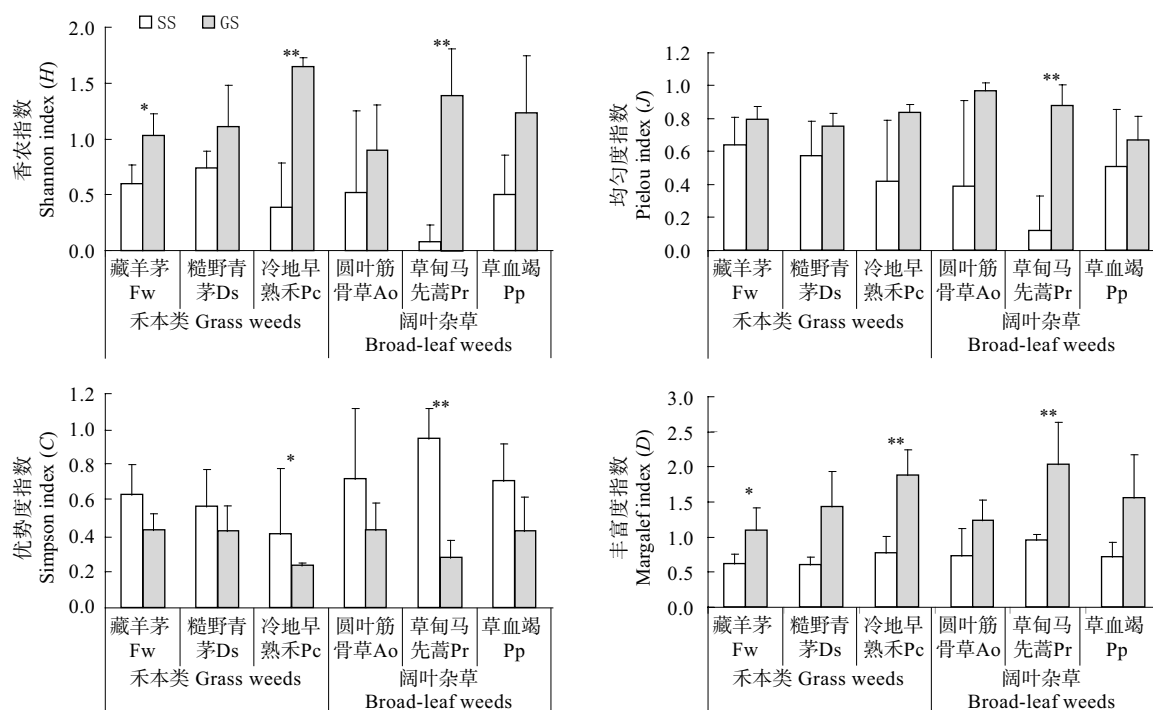


图3 中小型土壤动物群落多样性季节动态 (平均值±标准差)。*表示季节间差异显著, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。SS: 雪被末期; GS: 生长季末期。

Fig. 3 Seasonal dynamics of soil meso- and microfauna community diversity. Values are mean $\pm$ SD). * indicates significant difference ($P < 0.05$) between two seasons. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. SS: Snowing season; GS: Growing season; Fw: *Festuca wallichanica*; Ds: *Deyeuxia scabrescens*; Pc: *Poa crymophila*; Ao: *Ajuga ovalifolia*; Pr: *P. roylei*; Pp: *Polygonum paleaceum*.

维螨科、绒螨科、长须螨科、美绥螨科等。雪被末期的优势类群矮蒲螨科在生长季末期没有采集到, 而美绥螨科成为常见类群, 稀有类群丽甲螨成为优势类群, 棘跳科和懒甲螨科成为常见类群。舟蛾科仅在生长季末期出现并为优势类群。表明高山草甸中小型土壤动物群落受季节影响较大。从一年中获得的土壤动物类群来看, 矮蒲螨科、美绥螨科和丽甲螨科为优势类群, 三者共占总个体数的79.57%, 常见类群包括棘跳科、疣跳科、长须螨科、懒甲螨科和舟蛾科5类, 占总数的13.89%, 其余19个为稀有类群, 仅占6.54%。雪被末期主要以弹尾目、前气门亚目和中气门亚目为主, 生长季末期除了弹尾目、前气门亚目和中气门亚目外, 还包括双翅目幼虫、鳞翅目幼虫和大量的甲螨亚目。雪被末期的优势物种矮蒲螨科和美绥螨科占了总数量的95.19%, 生长季末期优势类群丽甲螨科和舟蛾科占总数的58.57%, 常见类群较多, 优势种和常见物种的个体数量的变化对群落总数量变化产生很大的影响。

高山草甸枯落物中土壤动物个体密度和类群数如图2所示, 两个季节6种枯落物中土壤动物个体密度季节差异均不显著, 表明季节对土壤动物个体密度没有较大的影响, 但藏羊茅 ($F = 10.706$, $P < 0.05$)、冷地早熟禾 ($F = 77.954$, $P < 0.01$)、草甸马先蒿 ($F = 12.451$, $P < 0.05$) 和草血竭 ($F = 15.706$, $P < 0.05$) 中两个季节的类群数存在显著差异, 表明高山草甸枯落物中土壤动物类群比土壤动物密度受季节影响更大。

2.2 土壤动物群落多样性特征

高山草甸雪被末期和生长季末期6种草本植物枯落物中

土壤动物群落各多样性指数存在一定的差异 (图3)。Shannon指数 H 、Pielou指数 J 和Margalef指数 D 在生长季末期高于雪被末期, Simpson指数 C 相反, 并且草甸马先蒿中中小型土壤动物各多样性指数在雪被末期和生长季末期差异极显著 ($P < 0.01$)。冷地早熟禾中雪被末期Shannon指数 H ($F = 29.453$, $P < 0.01$)、Margalef指数 D ($F = 24.697$, $P < 0.01$) 差异极显著, 而Simpson指数 C 差异显著。藏羊茅中Shannon指数 H ($F = 8.322$, $P < 0.05$) 和Margalef指数 D ($F = 10.914$, $P < 0.05$) 在雪被末期和生长季末期差异显著。通过 T 检验, 两个类型的草本植物凋落叶分解过程中, 土壤动物群落的4个多样性指数在两季节间差异不显著 ($P > 0.05$), 禾本类Shannon指数 H 和Pielou指数 J 高于阔叶杂草, 生长季末期禾本类Margalef指数 D 高于阔叶杂草 (图4)。

从表3可以看出, 雪被末期和生长季末期各物种中Sorensen相似性系数均低于0.5, 表明高山草甸中小型土壤动物群落组成有较大的季节差异。但是, 两个季节禾本类枯落物间Sorensen相似性系数高, 阔叶杂草枯落物间相似性系数高, 两个季节草血竭中土壤动物类群与几个物种之间都具有一定的相似性。

枯落物种类对土壤动物群落结构影响不显著 (表4), 季节对土壤动物多样性和类群密度有显著影响 ($P < 0.05$), 而枯落物种类和季节的交互作用对土壤动物多样性和个体密度影响不显著, 但对类群密度影响显著。

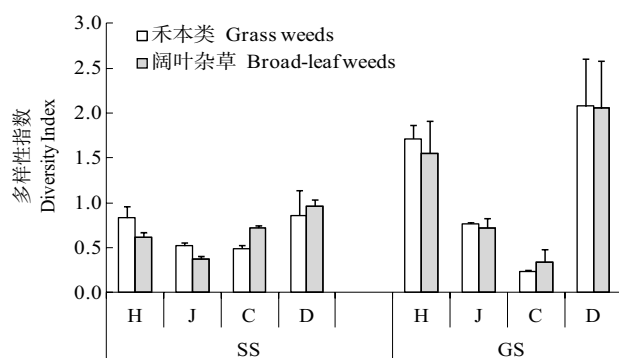


图4 禾本类和阔叶杂草凋落叶中小型土壤动物群落多样性 (平均值±标准差). SS: 雪被末期; GS: 生长季末期; H: Shannon-Wiener多样性指数; J: Pielou均匀性指数; C: Simpson优势度指数; D: Margalef丰富度指数.

Fig. 4 Soil meso- and microfauna diversities in leaf litter of graminoids and forbs. Values are mean $\pm$ SD. SS: Snowing season; GS: Growing season; H: Shannon-Wiener index; J: Pielou index; C: Simpson index; D: Margalef index.

2.3 土壤动物多样性与温度、水分的相关性

高山草甸6种枯落物中中小型土壤动物群落季节动态与时期均温和枯落物含水量的相关分析结果如表5. 土壤动物类群密度和多样性指数与时期均温和枯落物含水量极显著相关 ($P < 0.01$), 而个体密度与时期均温和枯落物含水量均无显著相关 ($P > 0.05$). 其中, 优势度指数C与时期均温存在

极显著负相关 ($P < 0.01$), 与枯落物含水量存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 其他指标与之相反.

3 讨论

川西高山草甸环境条件具有明显的季节性 (图1和表1). 前期的研究结果^[10, 20]与本研究结果均表明川西高山草甸中小型土壤动物群落的类群数和多样性指数具有显著的季节变化. 本研究发现, 从雪被末期到生长季末期, 土壤动物类群数目上升, 但个体数量减少. Shannon指数H、Pielou指数J和Margalef指数D升高, Simpson指数C下降. 王振海等在长白山地区的研究表明, 时间变化对土壤动物的多样性有一定的影响^[21]. 张洪芝等在若尔盖高寒草甸地区的研究表明, 土壤动物的个体数4月份较少, 而多样性指数在10月份最大^[11], 与此研究结果存在差异, 这可能是地区差异的原因. 本研究没有进行湿生动物的分离, 所捕获的干生中小型土壤动物类群与吴鹏飞等^[10]在米亚罗高山草甸获得的土壤动物类群相近, 但个体数远低于吴鹏飞等分离到的个体数, 其原因是本实验分离的仅仅是枯落物分解过程中的土壤动物, 而不包括土壤中的土壤动物. 不同土壤动物类群对环境变化有不同的适应策略, 从而使其在变化的环境中维持较高的数量和活性水平^[15, 22]. 雪被期高山草甸环境恶劣, 只适合少数土壤动物类群的生存, 同时由于缺少竞争, 极易产生优势种群, 整个群落的多样性

表3 不同季节土壤动物Sorensen相似性系数

Table 3 Similarity index of soil fauna between snowing season and growing season

枯落物物种 Species	生长季末期 Growing season					
	藏羊茅 <i>Festuca wallichanica</i>	糙野青茅 <i>Deyeuxia scabrescens</i>	冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	圆叶筋骨草 <i>Ajuga ovalifolia</i>	草甸马先蒿 <i>P. roylei</i>	草血竭 <i>Polygonum paleaceum</i>
雪被末期 Snowing season						
藏羊茅 <i>Festuca wallichanica</i>	0.17					
糙野青茅 <i>Deyeuxia scabrescens</i>	0.4	0.27				
冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	0.17	0.17	0.13			
圆叶筋骨草 <i>Ajuga ovalifolia</i>	0	0	0	0		
草甸马先蒿 <i>P. roylei</i>	0	0	0	0	0.18	
草血竭 <i>Polygonum paleaceum</i>	0.17	0.17	0.13	0.22	0	0.29

表4 枯落物分解中土壤动物多样性的双因素方差分析表 (F值)

Table 4 Two-way ANOVA of soil fauna diversity (F)

来源 Source	多样性指数 H	均匀度指数 J	优势度指数 C	丰富度指数 D	个体密度 Individual density	类群密度 Group density
枯落物物种 Species	0.564	0.765	0.396	0.477	2.815	1.594
季节 Season	32.885*	19.084*	30.911*	48.263*	0.034	60.001*
枯落物物种*季节 Species * Season	2.044	1.818	1.961	2.313	2.143	2.741*

H: Shannon-Wiener多样性指数; J: Pielou均匀性指数; C: Simpson优势度指数; D: Margalef丰富度指数.

H: Shannon-Wiener index; J: Pielou index; C: Simpson index; D: Margalef index. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

表5 分解中土壤动物群落结构与分解温度和含水量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil fauna community structure and environment factors

群落参数 Community parameter	个体密度 Individual density	类群密度 Group density	多样性指数 H	均匀度指数 J	优势度指数 C	丰富度指数 D
时期日均温 Average daily temperature	-0.034	0.760**	0.702**	0.617**	-0.703**	0.756**
枯落物含水量 Water content of litters	0.140	-0.611**	-0.584**	-0.519**	0.580**	-0.652**

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. H: Shannon-Wiener多样性指数; J: Pielou均匀性指数; C: Simpson优势度指数; D: Margalef丰富度指数.

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. H: Shannon-Wiener index; J: Pielou index; C: Simpson index; D: Margalef index.

则较低。而生长季节随着温度的回升,草本植物萌发并覆盖地表,改变了土壤温湿条件及土壤食物链结构^[23-24],双翅目、鳞翅目和鞘翅目等一些入土越冬类群开始活动。植被生长旺盛^[25],土壤动物食物源丰富,使土壤动物类群数在生长季节得到增加,但由于凋落袋内有限的生存空间和单一的食物源,凋落物袋内获得的个体数量反而减少,造成本研究结果土壤动物个体密度受季节影响不显著。这种变化体现了各类群的生物生态习性上的差异及对其环境的适应。但本实验存在采样次数少、时间短的局限性,加上土壤动物的活动性,实验结果可能存在随机性等不确定因素,因此,将来还需要通过增加采样次数等进一步验证研究结果的可靠性。

研究表明,草本植物分解的两个季节土壤动物群落相似性低,高山草甸土壤动物群落物种组成有较大的季节差异。然而,由于草本植物物种差异,两个时期土壤动物多样性差异不同,同一功能群的草本植物枯落物残体间的土壤动物相似性较高。这表明土壤动物群落结构不仅受季节变化的影响,还受凋落物组成的影响^[26]。草地植物群落物种组成^[27],能够影响土壤动物群落组成和结构。本研究发现禾本类枯落物中土壤动物比阔叶杂草枯落物中丰富,但是差异不显著(图4)。进一步分析凋落物种类和季节对土壤动物群落结构的影响(表4),发现在川西高山草甸生态系统中,物种组成对土壤动物群落多样性的影响不显著,土壤动物群落多样性主要受季节变化的影响。这和大多数研究结果物种组成是影响土壤动物群落结构的主要因素不同^[28-29],可能是本研究区地处高寒草甸生态系统,环境条件恶劣,季节差异显著,导致土壤动物对季节变化引起的环境差异较草甸物种组成的响应更显著。

草甸生态系统是蜱螨目的良好栖息地^[26]。两个时期分解袋内的土壤动物类群以蜱螨目为主,但优势类群和常见类群在雪被末期和生长季末期发生明显变化(表2),雪被末期的优势类群逐渐成为生长季末期的常见类群甚至稀有类群,而稀有类群逐渐成为常见类群。雪被末期出现的矮蒲螨科、巨须螨科和大赤螨科等在生长季末期没有出现,而舟蛾科、绒螨科和隐翅甲科等仅在生长季末期出现并占有很大的数量。进一步表明川西高山草甸土壤动物群落物种组成具有明显的季节特征,同时也反应出稀有类群和常见类群对季节变化具有较高的敏感性。这主要是由于不同土壤动物对温湿度变化响应机制和能力不同的结果^[30-31]。温湿度的变化引起土壤动物种间竞争关系被破坏,从而引起群落优势种和组成发生改变。温度和湿度的季节变化从总体上影响着土壤动物群落组成及其季节动态^[30, 32]。本研究结果也表明土壤动物受到时期均温和枯落物含水量的影响极显著($P < 0.01$)(表4)。雪被可以通过影响温度和湿度间接地影响土壤动物群落结构^[15, 33],其他环境因子也可能对土壤动物产生影响。如紫外线辐射可对线虫、螨类和弹尾目的数量产生抑制作用^[34-35]。川西高山草甸海拔高,夏季太阳紫外线辐射强,也可能是影响中小型土壤动物季节变化的原因之一。由于自然环境非常恶劣,川西高山草甸的土壤动物多样性要低于其他自然植被^[12, 30]。本研究没有采用排除土壤动物的方法,关于高山草甸土壤动物在草本枯落物中的作用,特别是不同时期对枯落物重量损失的贡献率在以后的研究中有待补充完善。

参考文献 [References]

- Nieminen JK. Soil animals and ecosystem processes: how much does nutrient cycling explain? [J]. *Pedobiologia*, 2008, **51** (5): 367-373
- 殷秀琴, 仲伟彦, 王海霞, 陈鹏. 小兴安岭森林落叶分解与土壤动物的作用[J]. 地理研究, 2002, **21** (6): 689-699 [Yin XQ, Zhong WY, Wang HX, Chen P. Forest litter decomposition and the role of soil animals of Xiaoxing'an Mountain [J]. *Geogr Res*, 2002, **21** (6): 689-699]
- Illig J, Norton RA, Scheu S, Maraun M. Density and community structure of soil-and bark-dwelling microarthropods along an altitudinal gradient in a tropical montane rainforest [J]. *Exp Appl Acarol*, 2010, **52** (1): 49-62
- Wall DH, Bradford MA, John MGST, Trofymow JA, Behan-Pelletier V, Bignell DE, Dangerfield J, Parton WJ, Rusek J, Voigt W, Wolters V, Gardel HZ, Ayuke FO, Bashford R, Beljakova OI, Bohlen PJ, Brauman A, Flemming S, Henschel JR, Johnson DL, Jones TH, Kovarova M, Kranabetter JM, Kutny L, Lin KC, Maryati M, Masse D, Pokarzhevskii A, Rahman H, Sabará MG, Salamon JA, Swift MJ, Varela A, Vasconcelos HL, White D, Zou X. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent [J]. *Global Change Biol*, 2008, **14** (11): 2661-2677
- Franklin E, Magnusson W, Luizão F. Relative effects of biotic and abiotic factors on the composition of soil invertebrate communities in an Amazonian savanna [J]. *Appl Soil Ecol*, 2005, **29** (3): 259-273
- 吴玉红, 蔡青年, 林超文, 黄晶晶, 程序. 地埂植物篱对大型土壤动物多样性的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (10): 5320-5329 [Wu YH, Cai QN, Lin CW, Huang JJ, Cheng X. Effects of terrace hedgerows on soil macrofauna diversity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (10): 5320-5329]
- 李兴鹏, 宋丽文, 李志勤, 龙莎, 陈越渠. 食根动物与植物的相互关系[J]. 应用生态学报, 2008, **27** (6): 999-1004 [Li XP, Song LW, Li ZQ, Long S, Chen YQ. Interrelations between root herbivore and plant [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27** (6): 999-1004]
- Brown VK, Gange AC. Insect herbivory below ground [J]. *Adv Ecol Res*, 1990, **20**: 1-58
- De Deyn GB, Raaijmakers CE, Zoomer HR, Berg MP, de Ruiter PC, Verhoef HA, Bezemer TM, van der Putten WH. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity [J]. *Nature*, 2003, **422** (6933): 711-713
- 吴鹏飞, 刘兴良, 刘世荣. 米亚罗高山草甸冬春两季土壤动物群落特征的比较[J]. 草业学报, 2009, **18** (5): 123-129 [Wu PF, Liu XL, Liu SR. Soil animal community characteristic comparison in winter and spring in MiYaLuo subalpine meadow northwestern Sichuan, China [J]. *Acta Prat Sin*, 2009, **18** (5): 123-129]
- 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 崔丽巍, 何先进, 熊远清. 青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化[J]. 生态学报, 2011, **31** (15): 4385-4397 [Zhang HZ, Wu PF, Yang DX, Cui LW, He XJ, Xiong YQ. Dynamics of soil meso- and microfauna communities in Zoige alpine meadows on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (15): 4385-4397]
- 黄旭, 文维全, 张健, 杨万勤, 刘洋, 闫帮国, 黄玉梅. 川西高山典型自然植被土壤动物多样性[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (1): 181-190 [Huang X, Wen WQ, Zhang J, Yang WQ, Liu Y, Yan BG, Huang YM. Soil faunal diversity under typical alpine vegetations in west Sichuan [J].

- Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (1): 181-190]
- 13 夏磊, 吴福忠, 杨万勤. 季节性冻融期间土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献[J]. 植物生态学报, 2011, **35** (11): 1127-1135 [Xia L, Wu FZ, Yang WQ. Contribution of soil fauna to mass loss of *Abies faxoniana* leaf litter during the freeze-thaw season [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (11): 1127-1135]
 - 14 刘瑞龙, 杨万勤, 吴福忠, 谭波, 王文君. 川西亚高山/高山森林凋落物分解过程中土壤动物群落结构及其多样性动态[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (3): 499-507 [Liu RL, Yang WQ, Wu FZ, Tan B, Wang WJ. Soil fauna community structure and diversity during foliar litter decomposition in the subalpine/alpine forests of western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (3): 499-507]
 - 15 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 夏磊, 杨玉莲, 王奥. 川西亚高山/高山森林大型土壤动物群落多样性及其对季节性冻融的响应[J]. 生物多样性, 2012, **20** (2): 215-223 [Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Xia L, Yang YL, Wang A. Soil macro-fauna community diversity and its response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan [J]. *Biodiv Sci*, 2012, **20** (2): 215-223]
 - 16 Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, Van Der Putten WH, Wall DH. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, **304** (5677): 1629-1633
 - 17 宋博. 松嫩平原羊草草甸凋落物分解中土壤动物群落特征及其作用研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008: 38-151 [Song B. Study on characteristics of soil fauna community and their function in litter decomposition in *Leymus chinensis* steppe, Songnen plain [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2008: 38-151]
 - 18 王星丽, 殷秀琴, 宋博, 辛未冬, 李波, 马宏彬. 羊草草原主要凋落物分解及土壤动物的作用[J]. 草业学报, 2011, **20** (6): 143-149 [Wang XL, Yin XQ, Song B, Xin WD, Li B, Ma HB. Main litter decomposition and the function of soil animal in *Leymus chinensis* grassland [J]. *Acta Prat Sin*, 2011, **20** (6): 143-149]
 - 19 尹文英, 胡圣豪, 沈韞芬, 宁应之, 孙希达, 吴纪华, 诸葛燕, 张云美, 王敏, 陈建英, 徐成纲, 梁彦龄, 王洪铸, 杨潼, 陈德牛, 张国庆, 宋大祥, 陈军, 梁荣来, 胡成业, 王慧芳, 张崇洲, 匡溥人, 陈国孝, 赵立军, 谢荣栋, 张骏, 刘宪伟, 韩美贞, 毕道英, 肖宁年, 杨大荣. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Yin WY, Hu SH, Shen YF, Ning YZ, Sun XD, Wu JH, ZhuGe Y, Zhang YM, Wang M, Chen JY, Xu CG, Liang YL, Wang HZ, Yang T, Chen DN, Zhang GQ, Song DX, Chen J, Liang LR, Hu CY, Wang HF, Zhang CZ, Kuang PR, Chen GX, Zhao LJ, Xie RD, Zhang J, Liu XW, Han MZ, Bi DY, Xiao NN, Yang DR. Pictorial keys to soil animals of China [M]. Beijing: Science Press, 1998]
 - 20 肖红艳, 刘红, 李波, 袁兴中, 孙书存, 陈忠礼. 亚高山草甸冬夏季牧场土壤动物群落多样性[J]. 中国农业科学, 2012, **45** (2): 292-301 [Xiao HY, Liu H, Li B, Yuan XZ, Sun SC, Chen ZL. Soil fauna diversity in the Rotational Grazing Pasture in subalpine meadow [J]. *Sci Agric Sin*, 2012, **45** (2): 292-301]
 - 21 王振海, 殷秀琴, 蒋云峰. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2014, **34** (3): 755-765 [Wang ZH, Yin XQ, Jiang YF. Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (3): 755-765]
 - 22 Darby BJ, Neher DA, Housman DC, Belnap J. Few apparent short-term effects of elevated soil temperature and increased frequency of summer precipitation on the abundance and taxonomic diversity of desert soil micro-and meso-fauna [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43** (7): 1474-1481
 - 23 Jones HG. Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
 - 24 Gongalsky KB, Persson T, Pokarzhevskii AD. Effects of soil temperature and moisture on the feeding activity of soil animals as determined by the bait-lamina test [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, **39** (1): 84-90
 - 25 刘庆. 亚高山针叶林生态学研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2002 [Liu Q. Ecological research on subalpine coniferous forests in China [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2002]
 - 26 Wu P, Liu X, Liu S, Wang J, Wang Y. Composition and spatio-temporal variation of soil microarthropods in the biodiversity hotspot of northern Hengduan Mountains, China [J]. *Eur J Soil Biol*, 2014, **62**: 30-38
 - 27 Viketoft M. Effects of six grassland plant species on soil nematodes: a glasshouse experiment [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40** (4): 906-915
 - 28 Hooper DU, Bignell DE, Brown VK, Brussaard L, Dangerfield JM, Wall DH, Wardle DA, Coleman DC, Giller KE, Lavelle P, VanDerPutten WH, DeRuiter PC, Rusek J, Silver WL, Tiedje JM, Wolters V. Interactions between aboveground and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: patterns, mechanisms, and feedbacks [J]. *BioSci*, 2001, **50** (12): 1049-1061
 - 29 Coleman DC, Whitman WB. Linking species richness, biodiversity and ecosystem function in soil systems [J]. *Pedobiologia*, 2005, **49** (6): 479-497
 - 30 王邵军, 阮宏华, 汪家社, 徐自坤, 吴焰玉. 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征[J]. 生态学报, 2010, **30** (19): 5174-5184 [Wang SJ, Ruan HH, Wang JS, Xu ZK, Wu YY. Composition structure of soil fauna community under the typical vegetations in the Wuyi mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (19): 5174-5184]
 - 31 Setälä H, Marshall VG, Trofymow J. Influence of micro-and macro-habitat factors on collembolan communities in Douglas-fir stumps during forest succession [J]. *Appl Soil Ecol*, 1995, **2** (4): 227-242
 - 32 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 张振才. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落一群落结构的季节变化及其气候因素[J]. 生态学报, 2003, **23** (1): 139-147 [Liao CH, Li JX, Yang YP, Zhang ZC. The community of soil animal in tropical rain forest in Jianfeng mountain, Hainan Island, China: relationship between seasonal change of community structure and climatic factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (1): 139-147]
 - 33 刘洋, 张健, 杨万勤. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展[J]. 生物多样性, 2009, **17** (1): 88-96 [Liu Y, Zhang J, Yang WQ. Responses of alpine biodiversity to climate change [J]. *Biol Sci*, 2009, **17** (1): 88-96]
 - 34 Robson TM, Pancotto VA, Scopel AL, Flint SD, Caldwell MM. Solar UV-B influences microfaunal community composition in a Tierra del Fuego peatland [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37** (12): 2205-2215
 - 35 Convey P, Pugh PJ, Jackson C, Murray AW, Ruhland CT, Xiong FS, Day TA. Response of antarctic terrestrial microarthropods to long-term climate manipulations [J]. *Ecology*, 2002, **83** (11): 3130-3140