2016-02-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.05007 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2016, 22 (1): 0027-0034

高山草甸冬季凋落物分解过程中土壤动物对微生物群落结构的影响*

李 俊 吴福忠 杨万勤 谭 波** 彭 艳 王 滨 常晨晖
四川农业大学生态林业研究所, 高山森林生态系统定位站, 长江上游生态安全协同创新中心 成都 611130

摘 要 于2013年11月至2014年4月, 采用微生物磷酸脂肪酸(PLFA)分析方法, 以川西高山草甸代表物种黄花亚菊(*Ajania nubigena*)和黑褐苔草(*Carex atrofusca*)凋落物为研究对象, 在雪被形成期、雪被稳定期和雪被融化期研究了凋落物分解过程中土壤动物对微生物群落结构及其多样性的影响. 结果表明: (1)整个冬季, 土壤动物增加了黄花亚菊凋落物分解过程中微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量以及细菌PLFA含量, 提高了其真菌/细菌比例, 减少了黑褐苔草中微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量以及细菌PLFA含量, 降低了其真菌/细菌比例; (2)在雪被形成期, 黄花亚菊凋落物中土壤动物显著增加了真菌表征脂肪酸18:2ω6,9c的含量, 但降低了细菌表征脂肪酸16:0、16:1ω9c、18:1ω7c的含量. 黑褐苔草凋落物中土壤动物显著增加了细菌表征脂肪酸18:1ω7c的含量, 但降低了真菌表征脂肪酸18:2ω6,9c的含量. 雪被融化期, 土壤动物显著增加了黑褐苔草凋落物中细菌表征脂肪酸16:1ω9c的含量, 降低了细菌表征脂肪酸a15:0和微真核生物表征脂肪酸18:3和20:4的含量; (3)土壤动物对凋落物中微生物多样性的影响主要在雪被融化期, 增加了黄花亚菊凋落物中微生物多样性、均匀性、丰富度和优势度指数, 降低了黑褐苔草凋落物中微生物多样性和均匀性指数, 增加了黑褐苔草凋落物中微生物丰富度和优势度指数. 这些结果表明, 冬季恶劣环境条件下高山草甸土壤动物仍然对微生物的数量、群落结构和多样性具有显著的影响. (图3 表4 参37)

关键词 高山草甸; 土壤动物; 土壤微生物; PLFA; 凋落物分解; 季节性雪被
CLC Q948.12

Effects of soil fauna on microbial community structure in foliar litter during winter decomposition in an alpine meadow*

LI Jun, WU Fuzhong, YANG Wanqin, TAN Bo**, PENG Yan, WANG Bin & CHANG Chenhui
Long-term Research Station of Alpine Forest Ecosystems, Institute of Ecology & Forest, Sichuan Agricultural University, Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Chengdu 611130, China

Abstract Interactions between soil fauna and microbial community in litter might ultimately manipulate the process of litter decomposition in terrestrial ecosystems. Little is so far known about such interactions during winter litter decomposition in cold biomes. This study aimed to understand the effects of soil faunal community on winter microbial community structure in folia litter during winter decomposition in cold biomes. Litterbags with foliar litter of *Ajania nubigena* and *Carex atrofusca* were respectively placed on the soil surface in an alpine meadow of Zhegu Mountain, Miyaluo Nature Reserve located in the upper reaches of Yangtze River and the eastern Tibet-Qingzang Plateau. After being incubated in situ on Nov. 13th, 2013, the litterbags were taken back on Dec. 6th, 2013 (Snow forming period, SFP), Mar. 5th, 2014 (Snow stable period, SSP) and Apr. 5th, 2014 (Snow melting period, SMP), respectively. The soil faunal and microbial communities in litter were measured by funnel method and phospholipid fatty acid (PLFA), respectively. The results showed that soil fauna generally increased the contents of total PLFA, fungal PLFA, and bacterial PLFA of microbial community in *A. nubigena* foliar litter, and raised the ratio of fungal PLFA to bacterial PLFA, but those in *C. atrofusca* foliar litter showed the opposite trends, implying that the interactions between soil faunal community and microbial community in winter litter decomposition depend on plant species. In the SFP, soil fauna increased fungal 18:2ω6,9c PLFA content in *A. nubigena* foliar litter, but decreased bacterial 16:0, 16:1ω9c and 18:1ω7c PLFA contents; soil fauna in *C. atrofusca* foliar litter increased bacterial 18:1ω7c PLFA content, but decreased fungal 18:2ω6,9c PLFA content. In the SMP, soil fauna in *C. atrofusca* foliar litter increased bacterial 16:1ω9c PLFA content, but decreased the contents of bacterial a15:0 PLFA, and micro-eukaryotic 18:3 and 20:4 PLFA. More significant effects of soil

收稿日期 Received: 2015-05-08 接受日期 Accepted: 2015-06-08
*国家自然科学基金项目(31170423和31270498)、国家"十二五"科技支撑计划(2011BAC09B05)、四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008和2012JQ0059)、中国博士后科学基金(2012T50782)和四川省教育厅青年基金(2013SZB0553)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170423 and 31270498), the Key Sci-tech Project of the "12th 5-year-plan" of China (2011BAC09B05), the China Postdoctoral Science Foundation (2012T50782) and the Youth Funds of Sichuan Provincial Deptment of Edueation
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: bobotan1984@163.com)

faunal community on microbial community structure in both foliar litters were observed in the SMP. During this period, soil fauna increased the indexes of Shannon-Wiener diversity, Pielou evenness, Margalef richness and Simpson dominance in microbial community of *A. nubigena* foliar litter. Meanwhile, soil fauna decreased the indexes of Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness in microbial community of *C. atrofusca* foliar litter, but increased the indexes of Margalef richness and Simpson dominance in microbial community. The results indicated that soil faunal community in litter greatly affects the structure and biodiversity of microbial community in foliar litter even under harsh environmental conditions, which in turn run the process of winter litter decomposition in the alpine meadow.

Keywords alpine meadow; soil fauna; soil microorganisms; PLFA; litter decomposition; seasonal snow-cover

凋落物分解作为生态系统物质循环与能量流动的核心过程之一，可在一定程度上影响生态系统碳的收支平衡，调控生态系统对气候变化的反馈[1]. 过去的认识认为寒冷区域冬季生物活动基本停滞[2]，但近年来越来越多的研究表明冬季冻结环境下仍然存在土壤动物和微生物等分解者活动[3]，并一定程度上作用于凋落物分解等关键冬季生态学过程. 然而，作为凋落物分解过程最为关键的驱动因子，土壤动物和微生物的关系并不明确. 一方面，土壤动物通过取食和破碎等活动改变凋落物形态，增加微生物在凋落物中的附着面积[4]；通过分泌物和排泄物提高微生物的底物有效性，促进微生物的生长[5]. 另一方面，部分土壤动物以微生物为食，从而限制微生物的生长并改变其群落结构[6]. 更为重要的是，这些过程还受到环境因子和凋落物分解过程中质量变化等因素的制约[7]. 高寒地区凋落物高峰主要形成于秋末冬初土壤冻结前[8]，相对适合的温度环境和富有丰富养分资源的新鲜凋落物为土壤动物和微生物提供了相对合适的生活环境[9]. 随着分解的进行，温度持续下降导致土壤的冻结以及经过前期快速的分解过程凋落物质量的下降可直接导致部分土壤动物的休眠甚至死亡，可能显著减小土壤动物对微生物的作用[10]. 冬去春来，地表温度的回升和冻结作用对凋落物质量的提高可促进分解者复苏，土壤动物和微生物的关系又变得密切. 可见，由于温度等环境因子以及凋落物质量变化对土壤动物和微生物的影响具有明显的差异[11]，使得高寒地区土壤动物与微生物的关系仍不明确，极大地限制了对凋落物分解过程的认识，亟待深入研究.

川西高山草甸位于青藏高原东缘，是长江上游重要水源涵养区，其能量流动和物质转化对维持区域生态安全有着极其重要的作用. 已有研究表明，该区域冬季仍有明显的土壤动物和微生物的活性[12]，可显著作用于凋落物分解等关键生态过程，但土壤动物与微生物间的相互作用仍不清楚. 因此，在已有研究的基础上，采用凋落物分解袋法，以区域代表性物种黄花亚菊（*Ajania nubigena*）、黑褐苔草（*Carex atrofusca*）凋落物为对象，研究季节性冻融期不同关键时期土壤动物对凋落物分解过程中微生物群落的影响，以期为更清晰地认识川西高山草甸生态系统凋落物分解等物质循环过程提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域设置在四川省理县鹧鸪山（31.85° N, 102.68° E），位于青藏高原东缘，杂谷脑河上游，为大渡河与岷江的分水岭，是重要的江河源区. 鹧鸪山山体海拔3 200-4 800 m，山地的垂直地带性明显，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，年均温6-12 ℃，1月均温–8 ℃，7月均温12.6 ℃，年积温为1 200-1 400 ℃，年降水量为600-1 100 mm，年蒸发量为1 000-1 900 mm. 冬季雪被期从10月到次年4月，长达6-7个月[12].

鹧鸪山高山草甸位于高山林线交错地带光照最强，蒸发量最大，地被物厚度最低的区域[13]. 试验选择海拔3 989 m的高山草甸设置1个研究样地，面积20 m × 20 m，坡向为东偏南14°，土壤为高山草甸土，地表石砾含量较高，植被以灌木和草本为主；主要有：黄花亚菊、黑褐苔草、细芒羊茅（*Festuca stapfii*）、珠芽蓼（*Polygonum viviparum*）、圆穗蓼（*Polygonum macrophyllum*）、垂穗披碱草（*Elymus nutans*）、异针茅（*Stipa aliena*）、短葶飞蓬（*Erigeron breviscapus*）、短毛紫菀（*Aster brachytrichus*）、长稃早熟禾（*Poa dolichachyra*）等. 黄花亚菊和黑褐苔草盖度分别约占样地植物盖度的30%和20%.

1.2 试验设计和样品处理

2013年10月，在研究样地收集已经枯死但未凋落的新鲜黄花亚菊和黑褐苔草凋落叶，将样品带回室内自然风干，然后准确称取样品10 g，分别装入不同孔径的分解袋（20 cm × 20 cm）中. 凋落叶分解袋是由两种孔径尼龙网缝合而成，表面层分别采用孔径为0.04 mm（排除土壤动物）和3.00 mm（允许所有土壤生物）的尼龙网[14-15]，贴地面层均采用孔径为0.04 mm的尼龙网. 另外，两个物种分别取相同质量（10 g）的风干叶各5袋，在65 ℃下烘干至恒重，由其计算出放置在网袋内样品的初始干重（黄花亚菊8.88 g、黑褐苔草8.87 g）.

于2013年11月13日土壤冻结前，在所选的样地选取3个7 m × 7 m的均质样方埋设分解袋，每个样方相隔100 m，埋设时去除样方内土壤表面的植物和凋落物，将凋落物袋平铺于地表. 每个样方分别放置0.04 mm和3.00 mm孔径的凋落物袋各72袋，共需222袋（2个孔径×2个树种×3个样方×6个重复×3个采样期＋6个备用袋＝222袋）. 样品埋设后，在每个样地内特定3.00 mm孔径凋落物袋内以及空气中，各放置1个纽扣式温度计（iButton DS1923-F5, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, USA），设定为每2 h记录一次数据，同步记录2013年11月至2014年4月凋落叶袋内和空气的温度数据.

为表征温度整体动态特征，计算了不同时期的日均温（Daily mean temperature, DMT）、昼均温（Mean

daytime temperature, MDT, 7:00-19:00）、夜均温（Mean nighttime temperature, MNT, 19:00-次日7:00）、正积温（Positive accumulated temperature, PAT）、负积温（Negative accumulated temperature, NAT）和冻融循环次数（Number of freeze-thaw cycles, NFTC, 温度高于或低于0 ℃持续3 h及以上直至其低于或高于0 ℃记为1次冻融循环）[16]. 研究期间温度动态如图1和表1所示.

表1 凋落物分解过程中温度特征
Table 1 Temperature characteristics in the litterbags during litter decomposition

温度特征 Temperature feature	位置 Position	雪被形成期 SFP (θ/℃)	雪被稳定期 SSP (θ/℃)	雪被融化期 SMP (θ/℃)
DMT	空气 Air	-2.3	-2.9	0.9
	凋落物袋 Litter bag	-2.3	-4.7	1.9
MDT	空气 Air	-1.5	-0.2	3.9
	凋落物袋 Litter bag	0.8	-1.0	5.3
MNT	空气 Air	-3.1	-5.6	-2.0
	凋落物袋 Litter bag	-8.6	-5.6	-1.6
PAT	空气 Air	0.0	15.3	96.5
	凋落物袋 Litter bag	0.0	0.7	119.3
NAT	空气 Air	-94.3	-217.9	-52.7
	凋落物袋 Litter bag	-201.4	-230.5	-31.4
NFTC	空气 Air	17	103	27
	凋落物袋 Litter bag	72	82	76
MDNFTC	空气 Air	0.38	1.45	0.53
	凋落物袋 Litter bag	1.60	1.15	1.49

DMT: 日均温; MDT: 昼均温; MNT: 夜均温; PAT: 正积温; NAT: 负积温; NFTC: 冻融循环次数; MDNFTC: 日均冻融循环次数.
SFP: Snow forming period; SSP: Snow stable period; SMP: Snow melting period. DMT: Daily mean temperature; MDT: Mean daytime temperature; MNT: Mean nighttime temperature; PAT: Positive accumulated temperature; NAT: Negative accumulated temperature; NFTC: Number of freeze-thaw cycles; MDNFTC: Mean daytime number of freeze-thaw cycles.

根据前期研究及历年当地气象资料, 每年11月至次年4月为冻融季节[17], 具体采样时间为雪被形成期（Snow formed period, SFP, 2013年12月6日）、雪被稳定期（Snow stable period, SSP, 2014年3月5日）、雪被融化期（Snow melt period, SMP, 2014年4月5日）这3个关键时期. 在每个样方随机采集不同物种不同孔径凋落物袋各6袋, 低温保存于装有冰袋的泡沫箱中, 带回室内. 其中3袋逐一装入透气土壤动物收集袋中, 用于鉴定、分类土壤动物（采用干漏斗法）[18], 另外3袋装入经高温灭菌的聚乙烯灭菌袋中, 用于测定微生物（采用测定磷脂脂肪酸的方法）.

1.3 微生物多样性及生物量测定

1.3.1 磷脂脂肪酸（PLFA）的命名 根据Frostegård等的命名方法[19], 以总碳数:双键数和双键距离分子末端位置命名, 即X:YωZ（c/t）. 后缀c（cis）和t（trans）分别表示双键的顺式和反式, 后缀i（iso）和a（anteiso）分别表示支链异构和反异构, 即指有一个甲基支链位于甲基链端旁的一个碳原子上或是隔一个碳原子. Br表示不知道甲基的位置, 10 Me表示一个甲基团在距分子末端第10个碳原子上, 环丙烷脂肪酸用cy表示. 本研究需要用到的标记PLFA见表2.

1.3.2 PLFA提取 所有操作均于通风厨内进行. 总脂质的提取参照White [20]对Bligh和Dyer [21]修改方法使用单相萃取. 称取凋落叶样品1.000（± 0.0050）g（干重）, 先后加入2.4 mL PBS（磷酸钾缓冲液0.05 mol/L, pH7.4）、6 mL甲醇、4 mL氯仿, 置于30 mL聚四氟乙烯的玻璃管内, 涡旋30 s, 超声匀化10 min, 37 ℃水浴30 min, 冷却后加PBS缓冲液6 mL和氯仿4 mL, 重复以上操作, 将两次提取液于50 mL分液漏斗中静置过夜. 以上所有操作需要在低温避光条件下进行.

收集氯仿相: 用有机纤维滤膜过滤, 旋转蒸发减少体

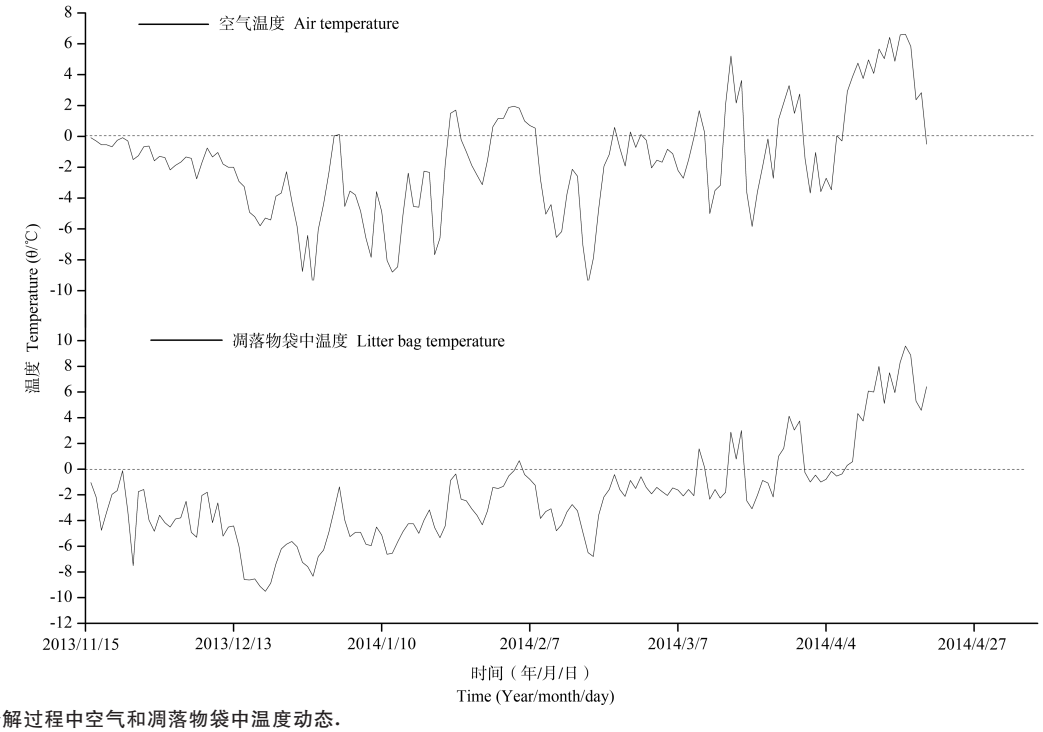


图1 凋落物分解过程中空气和凋落物袋中温度动态.
Fig. 1 Temperature dynamics in the air and litterbags during the decomposition.

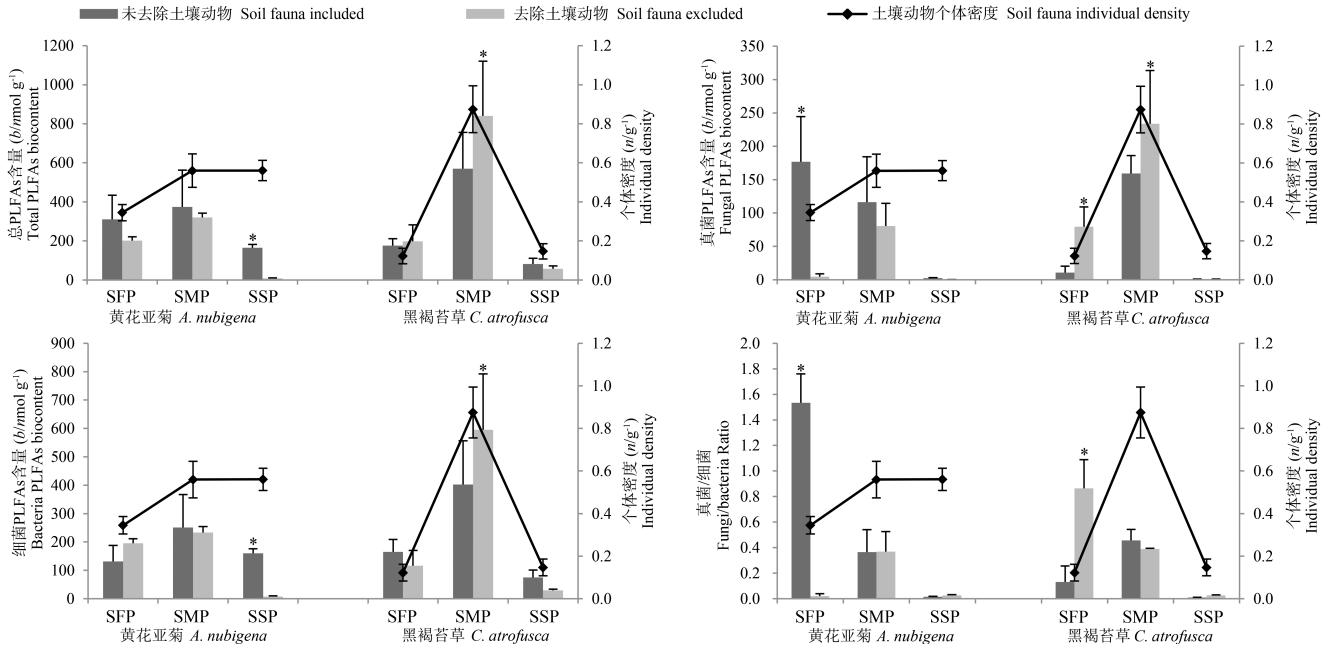


图2 凋落物分解过程中微生物PLFAs以及土壤动物个体密度变化特征. SFP: 雪被形成期; SSP: 雪被稳定期; SMP: 雪被融化期. *表示差异显著 ($P < 0.05$).
Fig. 2 Changes of PLFAs and soil fauna individual density during the litter decomposition. SFP: Snow forming period; SSP: Snow stable period; SMP: Snow melting period. n: number of soil fauna. * indicates significant difference, $P<0.05$.

积, 过活性硅胶柱, 依次用氯仿(3 × 2 mL)和丙酮(3 × 2 mL)去除非极性磷脂和糖脂. 将甲醇(3 × 2 mL)洗脱的极性磷脂用氮气吹干, 残余物用碱性甲醇分解后冷却, 用1 mol/L乙酸中和, 生成的FAMEs(脂肪酸甲酯)再采用2 mL氯仿:己烷(*V*/*V* 1:4)提取, 氮气吹干, 溶解于氯仿:己烷(*V*/*V* 1:4)中, 以十九烷酸甲基酯(19:0)为内标物. 将提取的待测液上机测定, 选取15-21个碳链长度的脂肪酸甲酯进行定性定量.

GC—MS条件: 不分流进样, 进样口温度300 ℃, 初始温度60 ℃, 保持1 min, 升温程序, 以30 ℃/min升至150 ℃, 保持4 min, 以4 ℃/min升至250 ℃, 保持15 min. 最后升至以25 ℃/min升至300 ℃, 保持6 min. 接口温度280 ℃, 氦气作载气, 流量为0.8 mL/min.

1.4 数据分析

(1) 群落结构: 土壤动物根据原始捕获量占捕获总量的百分比来划分各类群数量等级、PLFA含量(单位质量凋落物样品含PLFA摩尔数nmol/g, 下同)占10%以上的类群为优势种类, 1%-10%之间的为常见种类, 1%以下的为稀有种类.

(2) Shannon-Wiener多样性指数: $H = -\sum_{i=1}^{S} P_i (\ln P_i)$.
式中, $P_i = n_i/N$, n_i为每个类群的个体数, N为总的个体数, S为类群数.

(3) Pielou均与性指数: $j = H/\ln S$.
式中, H为Shannon-Wiener多样性指数, S为类群数.

(4) Simpson优势度指数$C = (n_i/N)^2$.
式中, n_i为每个类群的个体数, N为总的个体数.

(5) Margalef丰富度指数$E = (S-1)/\ln N$.
式中, S为类群数, N为全部类群的个体总数.

数据统计与分析采用SPSS 20.0和Excel 2010完成, 采用独立样本T检验(Independent-samples T test)分析土壤动物对微生物PLFA含量和多样性指数的影响, 显著性水平设定为0.05, 采用相关性分析(Correlation analysis)了解温度指标同微生物PLFA含量及多样性之间的关系, 采用双尾检验, 显著水平为0.01和0.05.

表2 表征特定微生物的PLFA生物标记物
Table 2 PLFAs used in this study as bioindicators

生物标记脂肪酸 Marker	代表菌种 Marker for
15:0, i15:0, a15:0, 16:0, i16:0, 17:0, i17:0, a17:0, 16:1ω7c, 16:1ω9c, 18:1ω7c, 16:1ω5t	细菌 Bacteria
18:2ω6,9c	真菌 Fungi
18:3, 20:4	微真核生物 Micro eukaryotes

2 结果

2.1 微生物PLFA含量

黄花亚菊凋落物分解过程中, 雪被形成期土壤动物增加了微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量和真菌/细菌比例, 降低了细菌PLFA含量; 在雪被稳定期土壤动物增加了微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量和细菌PLFA含量; 在雪被融化期, 土壤动物显著增加了微生物总PLFA含量和细菌PLFA含量; 整个冬季, 土壤动物增加了黄花亚菊凋落物中微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量和细菌PLFA含量, 提高了真菌/细菌比例. 黑褐苔草凋落物分解过程中, 土壤动物在雪被形成期增加了黑褐苔草凋落物中细菌PLFA含量, 降低了微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量和真菌/细菌比例; 在雪被稳定期土壤动物增加了真菌/细菌比例, 降低了微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量和细菌PLFA含量; 雪被融化期土壤动物增加了微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量和细菌PLFA含量, 降低了真菌/细菌比例; 整个冬季来看, 土壤动物减少了黑褐苔

表3 不同时期、不同孔径、不同物种PLFAs分布情况
Table 3 The distribution of PLFAs in different periods, apertures and species (%)

时间 Time	物种 Species	土壤动物 Soil fauna	i15:0	a15:0	16:0	17:0	a17:0	16:1ω7c	15:0	16:1ω5t	18:3	i17:0	16:1ω9c	18:1ω7c	18:2ω6,9c	20:4	细菌 Bacteria	真菌 Fungi
雪被形成期 SFP	黄花亚菊	不去除 Included	0.4	2.5	17.9	0.3	0.4	0.2	1.6	0.0	0.3	1.7	5.3	12.1	57.1	0.2	42.4	57.1
	A. nubigena	去除 Excluded	0.3	4.2	39.7	0.4	0.5	0.2	3.9	0.0	0.5	4.5	11.5	31.7	2.2	0.4	96.9	2.2
	黑褐苔草	不去除 Included	1.4	7.4	33.6	0.6	1.6	1.9	2.5	0.1	0.2	2.7	13.2	28.6	6.0	0.2	93.5	6.0
	C. atrofusca	去除 Excluded	1.3	5.6	26.6	0.5	0.8	1.4	1.8	0.0	0.3	1.8	14.1	5.0	40.2	0.7	58.8	40.2
	总比例	不去除 Included	0.7	4.3	23.6	0.4	0.8	0.8	1.9	0.0	0.3	2.1	8.2	18.1	38.6	0.2	60.9	38.6
	Total ratio	去除 Excluded	0.8	4.9	33.2	0.5	0.6	0.8	2.9	0.0	0.4	3.2	12.8	18.5	21.0	0.5	78.1	21.0
雪被稳定期 SSP	黄花亚菊	不去除 Included	4.3	7.7	23.0	1.0	1.4	20.3	2.7	0.0	0.4	0.0	1.9	4.8	31.1	1.2	67.2	31.1
	A. nubigena	去除 Excluded	6.1	9.4	16.6	1.5	2.2	19.7	5.8	0.0	0.5	2.8	3.6	5.1	25.2	1.4	72.8	25.2
	黑褐苔草	不去除 Included	6.6	14.4	13.7	2.1	2.2	15.7	3.2	0.0	0.6	1.8	3.5	7.3	27.9	0.8	70.6	27.9
	C. atrofusca	去除 Excluded	6.8	8.0	14.2	2.0	2.1	16.1	4.5	0.0	0.5	1.9	5.5	9.7	27.8	0.9	70.8	27.8
	总比例	不去除 Included	5.7	11.8	17.4	1.7	1.9	17.5	3.0	0.0	0.6	1.1	2.8	6.3	29.2	1.0	69.3	29.2
	Total ratio	去除 Excluded	6.4	12.6	14.8	1.9	2.2	17.1	4.2	0.0	0.6	2.1	3.5	6.5	26.9	1.1	71.4	27.1
雪被融化期 SMP	黄花亚菊	不去除 Included	2.3	5.0	0.1	1.6	1.7	0.2	0.3	0.1	0.0	0.2	85.4	0.2	1.5	1.5	97.1	1.5
	A. nubigena	去除 Excluded	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.3	0.0	0.0	94.1	0.0	2.4	1.4	96.2	2.4
	黑褐苔草	不去除 Included	1.4	4.5	0.0	1.1	1.1	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	82.5	0.5	0.7	7.0	92.2	0.7
	C. atrofusca	去除 Excluded	4.2	17.8	0.2	3.8	0.0	0.0	0.8	0.0	27.0	0.6	24.0	0.0	1.3	20.3	51.4	1.3
	总比例	不去除 Included	2.0	4.8	0.1	1.5	1.5	0.3	0.4	0.1	0.0	0.1	84.5	0.3	1.2	3.3	95.5	1.2
	Total ratio	去除 Excluded	3.7	15.7	0.2	3.4	0.0	0.0	0.8	0.2	23.8	0.6	32.1	0.0	1.4	18.1	54.4	1.5
冬季黄花亚菊比例 Winter ratio for *A. nubigena*		不去除 Included	2.5	5.3	16.7	0.9	1.1	9.0	1.8	0.0	0.3	0.7	19.4	6.6	34.8	0.9	64.0	34.8
		去除 Excluded	3.8	7.3	25.2	1.1	1.5	12.0	5.0	0.0	0.5	3.4	7.9	15.2	16.1	1.0	82.4	16.1
冬季黑褐苔草比例 Winter ratio for *C. atrofusca*		不去除 Included	5.0	12.0	16.6	1.7	2.0	11.3	2.8	0.0	0.5	1.8	13.3	11.2	20.6	1.3	77.6	20.6
		去除 Excluded	5.6	8.0	15.7	1.8	1.7	12.6	3.8	0.0	1.8	1.8	8.0	8.3	28.7	1.9	67.6	28.7
冬季总比例 Total ratio in winter		不去除 Included	3.7	8.6	16.6	1.3	1.5	10.1	2.3	0.0	0.4	1.2	16.4	8.8	27.8	1.1	70.7	27.8
		去除 Excluded	4.6	10.5	19.5	1.6	1.6	11.5	3.6	0.0	1.6	2.4	7.6	9.7	24.0	1.7	72.4	24.6

SFP: Snow forming period; SSP: Snow stable period; SMP: Snow melting period.

草中微生物总PLFA含量、真菌PLFA含量以及细菌PLFA含量, 降低了其真菌/细菌比例.

2.2 微生物群落结构特征

雪被形成期, 黄花亚菊凋落物在未去除土壤动物时, 代表真菌的脂肪酸18:2ω6, 9c所占比例最高, 达57.1%. 其次是代表细菌的16:0和18:1ω7c分别为17.9%和12.1%(表3). 而无土壤动物时, 真菌含量明显下降, 仅占总量的2.2%, 此时表征细菌的16:0和18:1ω7c增加到了39.7%和31.7%. 在黑褐苔草凋落物中有土壤动物的情况下真菌的相对含量则明显降低, 从40.2%降到了6.0%, 而细菌表征物16:0和18:1ω7c分别从26.6%增加到33.6%和从5.0%增加到28.6%, 其余含量较低的脂肪酸也在有土壤动物的情况下有所增加. 雪被稳定期, 有土壤动物时, 黄花亚菊凋落物中的真菌相对含量较雪被形成期有所降低, 但仍然多于同时期无土壤动物时真菌相对含量. 在黑褐苔草凋落物中, 微生物的相对含量变化很小, 此时土壤动物的影响明显降低. 到雪被融化期, 真菌相对含量明显降低, 均未超过0.5%, 16:1ω9c含量急剧上升, 其中黄花亚菊凋落物中有土壤动物时真菌为85.4%, 无土壤动物时达94.1%, 黑褐苔草凋落物中有土壤动物时, 其含量为82.5%, 而无土壤动物时仅24.0%.

2.3 不同土壤动物处理下微生物多样性变化特征

土壤动物对微生物多样性指数和均匀性指数的作用主要发生在雪被融化期, 且土壤动物对黄花亚菊凋落物中微生物起到促进作用, 但抑制了黑褐苔草凋落物中微生物. 土壤动物对整个冬季黄花亚菊凋落物中微生物的优势度指数的增加都有较大贡献, 同时在雪被融化期明显增加了黑褐苔草凋落物中微生物的优势度指数. 对整个冬季而言, 土壤动物对微生物的丰富度影响并不大, 仅在雪被融化期明显增加了黄花亚菊凋落物中微生物的丰富度(图3).

2.4 温度同冬季凋落物中微生物的相关关系

相关性结果(表4)表明, 黄花亚菊凋落物中, 日均温、昼均、正积温和负积温与细菌、真菌PLFA含量显著负相关($P < 0.05$), 与总PLFA含量、多样性指数、均匀性指数、丰富度指数极显著负相关($P < 0.01$), 与优势度指数极显著正相关($P < 0.01$); 夜均温与真菌/细菌和多样性指数呈显著负相关关系($P < 0.05$), 与均匀性指数和丰富度指数呈极显著负相关关系($P < 0.01$), 与优势度指数呈极显著正相关关系($p < 0.01$). 黑褐苔草凋落物中, 日均温和昼均温与真菌/细菌显著负相关($p < 0.05$), 与细菌、真菌和总PLFA含量以及多样性指数和均匀性指数极显著负相关($P < 0.01$), 同优势度指数极显著正相关($P < 0.01$); 夜均温同多样性指数显著负相关($P < 0.05$), 同真菌/细菌、均匀性指数和丰富度指数极显著负相关($P < 0.01$), 同优势度指数极显著正相关($P < 0.01$); 正积温与细菌、真菌和总PLFA含量呈显著负相关关系($P < 0.05$), 与真菌/细菌、多样性指数、均匀性指数和丰富度指数呈极显著负相关关系($P < 0.01$), 与优势度指数呈极显著正相关关系($P < 0.01$); 负积温与细菌和总PLFA含量及丰富度指数显著负相关($P < 0.05$), 与真菌PLFA含量、真菌/细菌、多样性指数和均匀性指数极显著负相关($P < 0.01$), 与优势度指数极显著正相关($P < 0.01$).

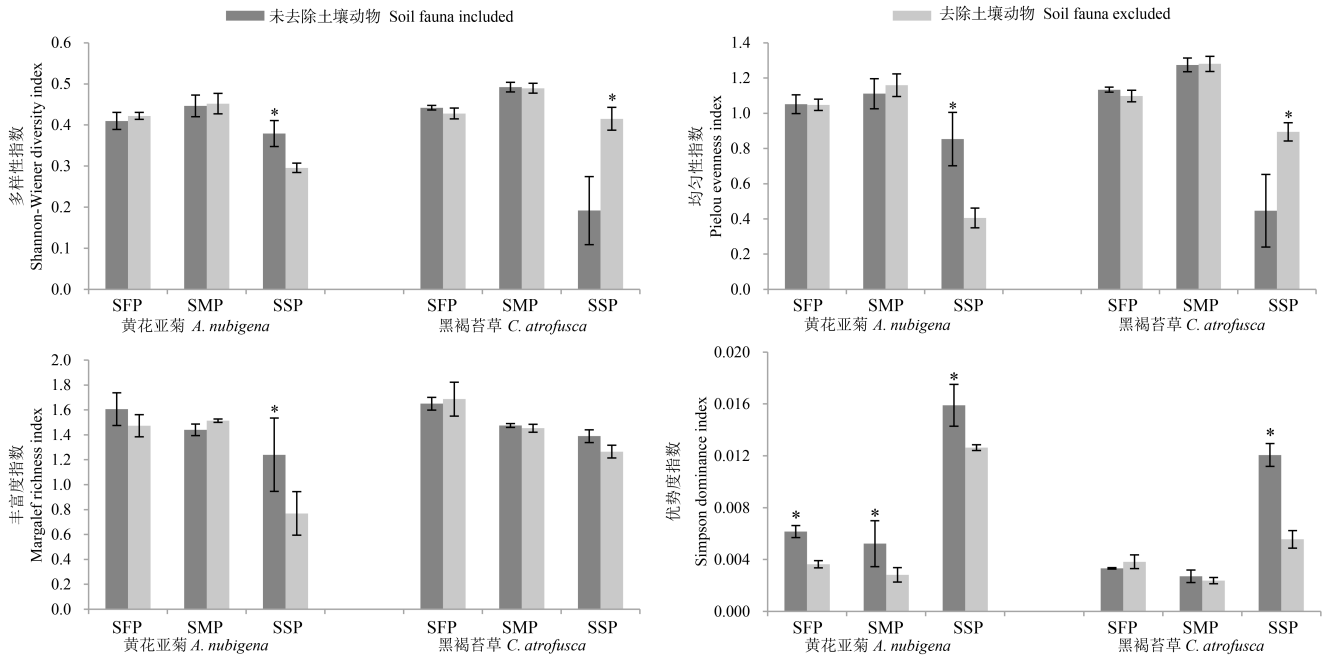


图3 凋落物分解过程中土壤微生物群落多样性动态. SFP: 雪被形成期; SSP: 雪被稳定期; SMP: 雪被融化期. *表示差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 3 Dynamics of diversity index of soil microorganism during litter decomposition. SFP: Snow forming period; SSP: Snow stable period; SMP: Snow melting period. * indicates significant difference, $P < 0.05$.

表4 冬季凋落物中微生物PLFA含量及多样性同温度的相关关系

Table 4 Correlation among PLFAs biocontent, microbial diversity and temperature of winter litter

凋落物微生物PLFA含量及多样性 PLFAs Biocontent and diversity of litter	黄花亚菊 *A. nubigena*							黑褐苔草 *C. atrofusca*						
	日均温 DMT	昼均温 MDT	夜均温 NDT	正积温 PAT	负积温 NAT	冻融循环次数 NFTC	日均冻融循环次数 MDNFTC	日均温 DMT	昼均温 MDT	夜均温 NDT	正积温 PAT	负积温 NAT	冻融循环次数 NFTC	日均冻融循环次数 MDNFTC
细菌PLFA含量 Bacteria PLFAs biocontent	-0.574*	-0.565*	-0.333	-0.503*	-0.539*	0.344	-0.420	-0.676**	-0.642**	-0.205	-0.497*	-0.574*	0.634**	-0.698**
真菌PLFA含量 Fungal PLFAs biocontent	-0.472*	-0.483*	-0.430	-0.492*	-0.493*	0.092	-0.173	-0.730**	-0.696**	-0.241	-0.547*	-0.627**	0.660**	-0.732**
总PLFA含量 Total PLFAs biocontent	-0.600**	-0.599**	-0.422	-0.563*	-0.586*	0.269	-0.357	-0.689**	-0.654**	-0.200	-0.503*	-0.583*	0.657**	-0.722**
真菌/细菌 Ratio of Fungal to Bacteria	-0.321	-0.358	-0.540*	-0.459	-0.413	-0.241	0.154	-0.544*	-0.568*	-0.596**	-0.617**	-0.599**	-0.018	-0.089
多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	-0.761**	-0.763**	-0.565*	-0.729**	-0.753**	0.304	-0.419	-0.686**	-0.687**	-0.510*	-0.657**	-0.679**	0.273	-0.377
均匀性指数 Pielou evenness index	-0.766**	-0.777**	-0.646**	-0.773**	-0.783**	0.212	-0.338	-0.809**	-0.814**	-0.622**	-0.786**	-0.808**	0.298	-0.423
丰富度指数 Margalef richness index	-0.599**	-0.623**	-0.636**	-0.670**	-0.654**	0.005	-0.120	-0.433	-0.490*	-0.790**	-0.650**	-0.577*	-0.401	0.276
优势度指数 Simpson dominance index	0.879**	0.899**	0.797**	0.914**	0.916**	-0.175	0.327	0.784**	0.796**	0.665**	0.793**	0.803**	-0.213	0.343

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $N = 54$.

3 讨论

由于高山草甸的特殊性, 土壤上方无高大树木的遮挡, 在雪被形成期只能形成浅薄的雪被, 受到阳光和大风的影响很快消融. 温度降低, 昼夜温差变大(9.4 ℃), 频繁的日均冻融循环(1.60次), 环境极不稳定, 导致微生物大量死亡[22], 这就是微生物PLFA含量处于较低水平的原因之一. 此时耐受性高、适应更低温度的微生物开始成为优势类群, 微生物群落处于一个极不稳定的状态, 多样性和均匀性都受到影响. 但大量的凋落叶也为土壤生物提供了的生存环境[3], 导致土壤微生物丰富度处于冬季最高的时期, 而优势度则相对降低. 此时, 土壤动物数量较少, 对微生物PLFA含量、多样性、丰富度及均匀性作用不大. 但通过进一步研究发现, 少量的土壤动物对微生物的群落结构依然有着十分显著的影响. 有研究表明, 在环境剧烈变化时, 真菌群落耐受性高[23], 占优势地位, 当环境适宜, 真菌数量便开始减少, 细菌群再次成为优势类群. 徐世晓、滕中华等研究发现黑褐苔草作为高寒草甸重要的牧草, 在枯草期能够形成较多的可溶性糖[24-25], 成为凋落物后能为土壤生物提供较多的营养物质. 土壤动物对黑褐苔草凋落物的啃食、破碎作用以及其排泄物能够为

微生物提供较好的生存环境，也就使得真菌含量变低，细菌含量升高，真菌/细菌比例下降. 相反黄花亚菊为菊科植物，Phurpa Wangchuk等人在不丹的黄花亚菊提取物中发现含有抗菌活性的物质，并具有细胞毒性[26]. 在雪被形成期，土壤动物的活动导致破碎的黄花亚菊凋落物释放更多的抑菌物质，造成比无土壤动物时更为恶劣的微环境，因而细菌PLFA含量下降，真菌PLFA含量升高，真菌/细菌比例升高.

随着温度的进一步降低，雪被增厚，日均冻融循环频次降低（1.15次），昼夜温差缩小（4.6 ℃），雪被稳定期成为冬季土壤环境最稳定的时期，此外，雪被形成期频繁的冻融循环对凋落物的破碎也为土壤生物留下更多可利用的物质，能为土壤动物和微生物提供良好的生存环境[27]. 然而，有研究发现，菊科植物释放的化感物质不仅对微生物有影响，同样能对昆虫产生拒食性[28]，随着冻融循环频次降低，淋溶作用减小，凋落物破碎所释放的化感物质较雪被形成期有所较少，因此土壤动物个体密度、微生物PLFA含量都有所增加. 此时，由于土壤动物的竞争作用，以及黄花亚菊释放的抑菌物质对微生物的影响，有土壤动物时凋落物中环境同样较无土壤动物时恶劣，真菌PLFA含量还是较高. 去除土壤动物时，微生物几乎没有能帮助其破碎凋落物的外界条件，随着营养物质逐渐被利用掉，竞争压力增大，真菌数量较雪被形成期明显增多. 不同处理的黑褐苔草凋落物中真菌PLFA含量同雪被形成期变化一致，但有土壤动物时细菌PLFA含量的增幅却低于无土壤动物时. 这说明虽然环境条件变得适宜土壤生物的生存，但随着土壤动物个体密度的增加，二者对于营养物质的竞争也在增强. 另外，土壤动物对微生物的取食也是导致未去除土壤动物处理中真菌、细菌数量较去除土壤动物处理低的原因.

随着时间推移，进入雪被融化期后，温度回暖，雪被融化，日均冻融循环频次增高（1.49次），其造成的淋溶作用导致大量营养物质流失[29]，昼夜温差变大（6.9 ℃），土壤环境再次变得很不稳定. 此时大量适应低温以及耐受性差的微生物开始死亡[30]，菌群数下降，这时无论是微生物数量、多样性、均匀性还是丰富度都达到整个冬季的最低点. 这同Wu等的研究结果类似，他们认为，温度升高会导致土壤微生物PLFA含量降低，微生物群落结构发生变化[31]. 同时凋落物受到冻融循环的破碎，剩余只能被部分微生物利用的物质为少数存活的微生物提供了有效基质[32]，使得优势度最高. 就在微生物受到最为剧烈环境变化的影响时，土壤动物的作用却开始变得明显. 雪被融化期在去除和未去除土壤动物的处理中，微生物的多样性有着明显差异. 由于温度的回暖，土壤动物开始活动[33]，其受到昼夜温差和极速升温的影响较微生物更小，此外，温度的回升，土壤动物回迁[34]以及刚从休眠中苏醒的土壤动物急需摄入大量食物来保证其生命活动，一方面和微生物产生竞争，另一方面土壤动物对凋落物的破碎作用以及其排泄物能为微生物提供良好的生存环境. 黄花亚菊凋落物中，在雪被稳定期土壤动物个体密度较黑褐苔草低，消耗掉的养分更少，进入雪被融化期留下的则更多，土壤动物能够利用冻融循环破碎凋落物以及凋落物解冻直接释放的营养物质维持生命活动[35]，因此对微生物产生的影响也更大，其排泄物为某些微生物提供了躲避恶劣环境的避难所. 因此可以看到，在黄花亚菊凋落物中，尽管微生物受到环境的影响，但在土壤动物的帮助下，仍然能够保持一定的活性. 黑褐苔草凋落物中，尽管此时土壤动物个体密度很低，但可以看到有土壤动物时，细菌PLFA含量占到了微生物总PLFA含量的92.2%，然而，去除土壤动物后却只有55.5%. 值得一提的是，在去除土壤动物后代表微真核生物的脂肪酸18:3和20:4含量分别占到了27.0%和20.3%，而有土壤动物时，这两种脂肪酸几乎不存在. 有研究认为，微真核生物通常只在北极、南极等极寒冷、干旱的环境下生存[36]. 这也说明在雪被融化期，土壤动物为黑褐苔草凋落物中的细菌提供了很好的生存环境，显著改变着微生物的群落结构.

综上所述，冬季严酷环境条件下凋落物分解过程中仍然具有明显的土壤动物和微生物活动，并表现出紧密的相互联系，但均受到低温和环境剧烈变化等因素的影响. 虽然凋落物类型和质量很大程度上调控着土壤动物类群、活性和取食方式等，但土壤动物也能通过自身对于凋落物质量变化的反馈作用于微生物，这与Yolima的观点[37]一致，即土壤动物对凋落物的影响可能主要是通过影响凋落物的最终分解者——微生物来实现的. 这些结果为进一步认识高寒系统物质循环与能量流动过程及其对气候变化的响应提供了一定的科学依据.

参考文献 [References]

1 Berg B, McClaugherty C. Plant Litter [M]. Berlin: Springer, 2003

2 Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Liu L, Yu S. Characteristics of soil animal community in the subalpine/alpine forests of western Sichuan during onset of freezing [J]. *Act Ecol Sin*, 2010, **30** (2): 93-99

3 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]

4 Thakur MP, Van Groenigen JW, Kuiper I, De Deyn GB. Interactions between microbial-feeding and predatory soil fauna trigger N_2O emissions [J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, **70**: 256-262

5 Schadt CW, Martin AP, Lipson DA, Schmidt SK. Seasonal dynamics of previously unknown fungal lineages in tundra soils [J]. *Science*, 2003, **301** (5638): 1359-1361

6 Crowther TW, Stanton DWG, Thomas SM, A'Bear AD, Hiscox J, Jones TH, Voříšková J, Baldrian P, Boddy L. Top-down control of soil fungal community composition by a globally distributed keystone consumer [J]. *Ecology*, 2013, **94** (11): 2518-2528

7 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

8 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

9 Berg MP, Kniese JP, Verhoef HA. Dynamics and stratification of bacteria and fungi in the organic layers of a Scots pine forest soil [J]. *Biol Fert Soils*, 1998, **26** (4): 313-322

10 Briones MJI, Ostle NJ, McNamara NP, Poskitt Jan. Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41** (2): 315-322

11 Baldrian P, Šnajdr J, Merhautová V, Dobiášová P, Cajthaml T, Valášková V. Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change [J]. *Soil Biol Biochem*, 2013, **56**: 60-68

12 陈亚梅, 和润莲, 邓长春, 刘洋, 杨万勤, 张健. 川西高山林线交错带凋落物纤维素分解酶活性研究[J]. 植物生态学报, 2014, **38** (4): 334-342 [Chen YM, He RL, Deng CC, Liu Y, Yang WQ, Zhang J. Litter cellulolytic enzyme activities in alpine timberline ecotone of western Sichuan [J]. *Chin J Plant Ecol,* 2014, **38** (4): 334-342]

13 刘洋, 张健, 杨万勤, 吴福忠, 黄旭, 闫帮国, 文维全, 胡开波. 川西高山树线群落交错带地被物及土壤的水文效应[J]. 林业科学, 2011, **47** (3): 1-6 [Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Wu FZ, Huang X, Yan BG, Wen WQ, Hu KB. Ground coverage and soil hydrological action of alpine treeline ecotone in western Sichuan [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47** (3): 1-6]

14 Crutsinger GM, Sanders NJ, Classen AT. Comparing intra-and inter-specific effects on litter decomposition in an old-field ecosystem [J]. *Bas Appl Ecol*, 2009, **10** (6): 535-543

15 Zwahlen C, Hilbeck A, Nentwig W. Field decomposition of transgenic Bt maize residue and the impact on non-target soil invertebrates[J]. *Plant and Soil*, 2007, **300** (1-2): 245-257

16 Konestabo HS, Michelsen A, Holmstrup M. Responses of springtail and mite populations to prolonged periods of soil freeze-thaw cycles in a sub-arctic ecosystem [J]. *Appl Soil Ecol*, 2007, **36** (2): 136-146

17 Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Deng RJ. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze–thaw season [J]. *Acta Oecol*, 2010, **36** (1): 135-140.

18 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Yin WY. Pictorical keys to soil animals of China [M]. Beijing: Science Press, 1998]

19 Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Phospholipid fatty acid composition, biomass, and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1993, **59** (11): 3605-3617

20 White DC, Davis WM, Nickels JS, King JD, Bobbie RJ. Determination of the sedimentary microbial biomass by extractible lipid phosphate [J]. *Oecologia*, 1979, **40** (1): 51-62

21 Bligh EG, Dyer WJ. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Cana J Biochem Physiol*, 1959, **37** (8): 911-917

22 Urakawa R, Shibata H, Kuroiwa M, Inagaki Y, Tateno R, Hishi T, Fukuzawa K, Hirai K, Toda H, Oyanagi N. Effects of freeze–thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in ten temperate forest ecosystems throughout the Japanese archipelago [J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, **74**: 82-94

23 Buckeridge KM, Grogan P. Deepened snow alters soil microbial nutrient limitations in arctic birch hummock tundra [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, **39** (2): 210-222

24 徐世晓, 赵新全, 孙平, 赵同标, 赵伟. 青藏高原5种牧草木质素含量及其体外消化率研究[J]. 西北植物学报, 2003, **23** (9): 1605-1608 [Xu SX, Zhao XQ, Xun P, Zhao TB, Zhao W. A study on acid detergent lignin content and digestibility of 5 species herbage in Tibetan plateau [J]. *Acta Bot Bor Occid Sin*, 2003, **23** (9): 1605-1608]

25 滕中华, 韩发, 师生波, 周党卫, 智丽. 青藏高原黑褐苔草的抗寒性物质季节变化动态研究[J]. 中国草地, 2003, **25** (4): 36-40 [Teng ZH, Han F, Shi SB, Zhou DW, Zhi L. Seasonal changes of substances related with cold resistance in *Catex atrofusca* in Qinghai-Tibetan plateau. *Grassl Chin*, 2003, **25** (4): 36-40]

26 Wangchuk P, Keller PA, Pyne SG, Korth J, Taweechotipatr M, Rattanajak R, Kamchonwongpaisan S. Antimicrobial, antimalarial and cytoxicity activities of constituents of a Bhutanese variety of *Ajania nubigena* [J]. *Nat Prod Comm: An Int J Comm Rev*, 2013, **8** (6): 733-736

27 武志超, 吴福忠, 杨万勤, 魏圆云, 王奥, 刘金玲. 高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态[J]. 生态学报, 2012, **32** (13): 4094-4102 [Wu ZC, Wu FZ, Yang WQ, Wei YY, Wang A, Liu JL. Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (13): 4094-4102]

28 Einhellig Frank A. Interactions involving allelopathy in cropping systems [J]. *Agron J*, 1996, **88** (6): 886-893

29 Lemma B, Nilsson I, Kleja DB, Olsson M, Knicker H. Decomposition and substrate quality of leaf litters and fine roots from three exotic plantations and a native forest in the southwestern highlands of Ethiopia [J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, **39** (9): 2317-2328

30 刘琳, 吴彦, 何奕忻, 吴宁, 孙庚, 张林, 徐俊俊. 季节性雪被对高山生态系统土壤氮转化的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (8): 2193-2200 [Liu L, Wu Y, He YX, Wu N, Xun G, Zhang L, Xu JJ. Effects of seasonal snow cover on soil nitrogen transformation in alpine ecosystem: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (8): 2193-2200]

31 Wu YP, Yu XS, Wang H, Ding N, Xu JM. Does history matter? Temperature effects on soil microbial biomass and community structure based on the phospholipid fatty acid (PLFA) analysis [J]. *J Soils Sed*, 2010, **10** (2): 223-230

32 Campbell JL, Mitchell MJ, Groffman PM, Christenson LM, Hardy JP. Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes [J]. *Front Ecol Environ*, 2005, **3** (6): 314-322

33 夏磊, 吴福忠, 杨万勤, 谭波. 川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献[J]. 应用生态学报, 2012, **23** (2): 301-3066 [Xia L, Wu FZ, Yang WQ, Tan B. Contribution of soil fauna to the mass loss of *Betula albosinensis* leaf litter at early decomposition stage of subalpine forest litter in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23** (2): 301-306]

34 Jones HG. Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems [M] . Cambridge: Cambridge University Press, 2001

35 Edwards KA, McCulloch J, Peter KG, Jefferies RL. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (9): 2843-2851

36 Fell JW, Scorzetti G, Connell L, Craig S. Biodiversity of micro-eukaryotes in Antarctic Dry Valley soils with< 5% soil moisture[J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (10): 3107-3119

37 Carrillo Y, Ball BA, Bradford MA, Jordan CF, Molina M. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43** (7): 1440-1449