



刺五加根际效应和土壤环境因子 对土壤跳虫群落结构的影响

杜亚彬¹ 马源淇¹ 王雪峰^{1*} 常 亮^{2*}

(1. 吉林农业大学中药材学院, 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 为明确刺五加根际效应和土壤环境因子对土壤跳虫的影响, 于2019年6—8月在中国科学院辽河源农业生态研究与示范基地调查刺五加根际和非根际土壤的跳虫总属数、个体数、功能性状参数以及群落特征参数, 同时利用 Pearson 分析法和冗余分析法研究刺五加根系分泌物和土壤环境因子对跳虫群落结构的影响。结果表明, 6—8月在根际土壤中捕获棘跳属跳虫 176 头, 所占比例为 34.37%, 为优势属, 捕获钩圆跳属、球角跳属、长脚跳属、德跳属跳虫分别为 26、37、32 和 31 头, 所占比例分别为 5.08%、7.23%、6.25% 和 6.05%, 均为常见属; 在非根际土壤中, 捕获棘跳属跳虫 91 头, 所占比例为 17.77%, 为优势属, 捕获钩圆跳属、球角跳属、长脚跳属、德跳属跳虫分别为 28、33、19 和 39 头, 所占比例分别为 5.47%、6.45%、3.71% 和 7.62%, 均为常见属; 6 月, 刺五加根际土壤的跳虫总属数、个体数、Pielou 均匀度指数分别为 3.50、14.92 和 0.72, 非根际土壤的跳虫总属数、个体数、Pielou 均匀度指数分别为 2.83、8.83 和 0.87, 与根际土壤的差异显著; 根际土壤跳虫的体宽、体长、触角与体长的比值、栖息环境功能性状值分别为 0.73 mm、4.4 mm、0.19 和 0.18, 显著低于非根际土壤跳虫的 0.79 mm、5.58 mm、0.32 和 0.40; 根际土壤 pH 与土壤跳虫群落的总属数、个体数呈正相关, 与 Pielou 均匀度指数呈负相关, 非根际土壤 pH 与土壤跳虫的个体数呈正相关; 德跳属、球角跳属跳虫与土壤丁香酸含量、水杨酸含量、没食子酸含量呈负相关, 长跳属跳虫与土壤丁香酸含量、水杨酸含量和没食子酸含量呈正相关, 棘跳属和钩圆跳属跳虫与土壤丁香酸含量呈负相关。表明土壤环境因子和刺五加根际效应对土壤跳虫群落有影响。

关键词: 土壤跳虫; 生物多样性; 根系分泌物; 土壤环境因子; 根际效应

Effects of rhizosphere effects of Siberian ginseng *Acanthopanax senticosus* and soil environmental factors on Collembola community composition in soil

DU Yabin¹ MA Yuanqi¹ WANG Xuefeng^{1*} CHANG Liang^{2*}

(1. College of Chinese Materia Medica, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin Province, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin Province, China)

Abstract: In order to clarify the influence of rhizosphere effect of Siberian ginseng *Acanthopanax senticosus* and soil environmental factors on soil Collembola, the total number of genera, number of individuals, functional trait parameters and community characteristic parameters of soil Collembola in the rhizosphere and non-rhizosphere of *A. senticosus* were investigated in the Liaoheyuan Agricultural Ecological Research and Demonstration Base of Chinese Academy of Sciences in June and August of 2019, and Pearson analytical method and redundancy analysis (RDA) were used to study the effects of root ex-

基金项目: 吉林农业大学科研启动基金资助项目(201632), 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190920KJ)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: wangxuefeng11@163.com, springtail@iga.ac.cn

收稿日期: 2020-05-05

updates of *A. senticosus* and soil environmental factors on the community structure of soil Collembola. The results showed that 176 individuals of *Protaphorura* spp. were captured in the rhizosphere, accounting for 34.37%, which was the dominant genera; 26 individuals of *Bourletiella* spp., 37 individuals of *Mitchellania* spp., 32 individuals of *Entomobrya* spp. and 31 individuals of *Desoria* spp. were captured, accounting for 5.08%, 7.23%, 6.25%, 6.05%, respectively, which were the common genera. A total of 91 individuals of *Protaphorura* spp. were captured in the non-rhizosphere (17.77%), which was the dominant genera; the numbers of *Bourletiella* spp., *Mitchellania* spp., *Entomobrya* spp., *Desoria* spp. were 28, 33, 19 and 39 individuals, respectively, accounting for 5.47%, 6.45%, 3.71%, 7.62%, which were the common genera. The total number of genera, number of individuals and Pielou evenness index of soil Collembola in the rhizosphere were 3.50, 14.92 and 0.72, respectively, in June; the total number of genera, number of individuals, and Pielou evenness index of soil Collembola in the non-rhizosphere were 2.83, 8.83, 0.87, respectively. There were significant differences between community parameters of soil Collembola in the rhizosphere and the non-rhizosphere. The functional trait values (body width, body length, the ratio of tantacle and body length, the habit of rhizosphere soil Collembola) were 0.73 mm, 4.4 mm, 0.19, 0.18, respectively, which were significantly lower than 0.79 mm, 5.58 mm, 0.32, 0.40 in the non-rhizosphere. The soil pH value in the rhizosphere had positive correlation with the total number of genus and the number of individuals, but had negative correlation with Pielou evenness index; soil pH in the non-rhizosphere had positive correlation with individuals' number. *Desoria* spp. and *Mitchellania* spp. had negative correlation with soil syringic acid content, soil salicylic acid content and soil gallic acid content, and *Entomobrya* spp. had positive correlation with soil syringic acid content, soil salicylic acid content and soil gallic acid content, and *Protaphorura* spp. and *Bourletiella* spp. had negative correlation with soil syringic acid content. It indicated that soil environmental factors and rhizosphere effect of *A. senticosus* significantly influenced the community of soil Collembola.

Key words: Collembola; biodiversity; root exudate; soil environmental factor; rhizosphere effect

土壤跳虫作为三大土壤动物之一(陈建秀等, 2007), 种类丰富且分布广泛(倪珍, 2015), 是土壤物质能量循环过程中最重要的土壤动物之一(黄玉梅, 2004), 在植物残体分解、土壤养分循环和调节土壤肥力等过程中发挥着重要作用(Filser, 2002)。土壤跳虫的栖息环境受植物根系分泌物、土壤理化性质和土壤生物等(林英华等, 2015; 王柏凤等, 2019)因素影响后, 其群落结构发生变化(尹文英, 2001)。如 Fujii et al. (2014) 研究结果表明根际碳显著促进土壤跳虫的生长; Liu et al. (2019) 研究结果表明土壤全碳、湿度等环境因素对土壤跳虫群落有显著影响; Rzeszowski et al. (2017) 研究发现土壤中各类元素显著影响土壤跳虫群落构成。此外, 植物根际效应也是影响土壤动物群落的重要因素, 如王雪峰等(2016)研究结果表明, 大豆根际区土壤线虫数量显著高于非根际区, 但线虫群落的复杂性低于非根际区。土壤跳虫受外界因素影响的同时, 也会影响周围的环境, 如调节土壤理化性质和微生物群落结构, 促进土壤养分循环, 为地上植物提供适宜的生长环

境(朱永恒等, 2012)。由于鉴定和检测较为困难, 关于土壤跳虫的研究相对较少。

刺五加 *Acanthopanax senticosus* 为多年生灌木, 隶属于五加科五加属, 具有健脾补肾、抗衰老等功效(涂正伟等, 2011; Han et al., 2014)。已有的刺五加生态学研究主要与微生物相关, 如武伦鹏等(2018)研究发现刺五加表层土壤中的微生物可有效分解三七总皂苷; 邓勋等(2014)研究结果显示木霉菌能够增加刺五加植株根部土壤生物量, 从而提高根际土壤微生物群落的稳定性。高原(2011)研究结果表明, 部分野生刺五加内生真菌菌株有明显的抑菌活性; 王新位等(2018)在刺五加内生放线菌中提取多种次生代谢产物, 其具有增殖、抗病毒等功能。此外, 刺五加作为植物, 可通过根系分泌将自身合成的各类化合物释放到土壤中(黄良伟等, 2017), 这些物质进入土壤中会导致土壤理化性质改变, 如 Shen et al. (2002) 研究结果表明根系分泌物对土壤中活性较低的结合态磷元素有活化作用, 使其转化为可溶态, 利于植物吸收; 同时这些物质进入土壤中也会使土

壤微生物群落结构发生变化(Michalet et al., 2013; 李娇等, 2014; 张丹, 2015), 如刘艳霞等(2016)研究结果表明土壤酚酸类物质对微生物生长发育有抑制作用, 进而土壤跳虫生存环境和食物资源发生改变, 致使土壤跳虫群落及多样性发生变化, 然而关于土壤跳虫群落与刺五加根际效应的关系尚未见报道。

为明确刺五加根际效应和土壤环境因子对土壤跳虫群落结构的影响, 本研究于2019年6—8月在中国科学院辽河源农业生态研究与示范基地采用Tullgren漏斗法对刺五加根际和非根际土壤跳虫进行收集, 测定土壤跳虫个体数、总属数, 计算土壤跳虫Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数等群落参数, 进而分析根际效应对土壤跳虫群落的影响, 并利用Pearson分析法和冗余分析(redundancy analysis, RDA)方法研究土壤全碳含量、全氮含量、速效磷含量、质量含水率、pH、没食子酸含量、丁香酸含量和水杨酸含量等环境因子与土壤跳虫群落的关系, 以期对土壤跳虫群落的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试剂及仪器: 试剂均为国产分析纯。Olympus-SZX16体式显微镜, 上海普赫光科技有限公司; LC-6A高效液相色谱仪、C18液谱柱(内径4.6 mm、柱长250 mm、粒径5 μm), 日本岛津公司; JIDI-20D高速离心机, 广州吉迪仪器有限公司; RE-201D 2L旋转蒸发仪, 上海浚和仪器有限公司; 101-1A型恒温干燥箱, 绵阳恒川电气设备销售有限公司; PHS-430酸度计, 北京阿普瑞斯科技有限公司; Vario Marco Cube元素分析仪, 成都测试狗科研服务有限公司; MX-S涡旋振荡仪, 北京博领生物科技有限公司; 直径5.2 cm, 长15 cm土钻, 定制; TJ-270-30A分光光度计, 天津恒创力达科技发展有限公司。

1.2 方法

1.2.1 土壤跳虫群落组成调查

2019年在中国科学院辽河源农业生态研究与示范基地内进行试验。刺五加苗龄均为1年, 2019年6月刺五加平均株高35 cm, 处于生长期(营养生长阶段), 7月平均株高为43 cm, 处于开花期(生殖生长阶段), 8月平均株高为51 cm, 处于结果期(生殖生长阶段)。随机选取4个样方, 每个样方长20 m、宽20 m, 每个样方间隔100 m以上以排除空间自相关的影响。在6、7、8月, 每个样方随机选取3株长势

相同刺五加植株作为样点进行调查, 采用土钻法采集样点根际土壤(距离刺五加垂直主根 ≤ 2.6 cm)和非根际土壤(距离刺五加垂直主根 > 2.6 cm), 装入自封袋中, 带回实验室进行分离, 其中1个样方内的样点用于土壤含水量测定, 其余3个样方内的样点用于土壤跳虫群落调查。土壤中跳虫采用Tullgren干漏斗法(Harsh & Shail, 2010)分离, 在体式显微镜下, 参照尹文英(1992)方法将所分离得到的跳虫鉴定到属, 分类并计数。根据每个属跳虫个体数量占所有土壤动物个体总数量的百分比对土壤动物数量等级进行划分, 当属个体数量百分比大于10%时, 为优势属, 当 $1\% \leq$ 属个体数量百分比 $< 10\%$ 时, 为常见属, 当属个体数量百分比小于1%为稀有属。跳虫分离后的土壤样品在自然状态下风干, 3个样点均用于土壤全碳含量、全氮含量、速效磷含量和pH的测定。

1.2.2 土壤跳虫群落特征参数的计算

本研究采用DPS 9.50数据处理系统计算Shannon-Wiener多样性指数、个体数、总属数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数5个土壤动物群落特征参数。Shannon-Wiener多样性指数 $H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$; Pielou均匀度指数 $J = H/\ln S$; Simpson优势度指数 $C = \sum_{i=1}^S (N_i/N)^2$, 式中 S 为所有属数; N_i 为第 i 个属的个体数, N 为群落中所有属的个体数; P_i 为第 i 个属所占比例, $P_i = N_i/N$ 。

1.2.3 土壤跳虫功能性状特征参数的计算

为进一步分析根际和非根际土壤跳虫群落分布的动态变化, 选取体长、体宽、触角与体长的比值、栖息环境作为土壤跳虫的性状特征参数(Silva et al., 2012)。根据Makkonen et al. (2011)的性状特征值计算土壤跳虫的性状特征参数。根际土壤跳虫的体长性状特征参数 $T_i = \sum_{i=1}^5 M_i x_i$, 式中 x_i 代表第 i 个物种的体长性状特征值, $i=1, 2, 3, 4, 5$, 分别代表钩圆蛱属、球角蛱属、长蛱属、棘蛱属和德蛱属跳虫的体长特征值(表1); M_i 代表当月某样点根际土壤中第 i 个物种的个体数与该样点根际土壤跳虫总数的比值, 根际土壤跳虫的体宽、触角与体长的比值、栖息环境的计算同体长的计算公式, 仅是将公式中体长换为体宽、触角与体长的比值和栖息环境性状特征值。非根际土壤跳虫的体长、体宽、触角与体长的比值、栖息环境等性状特征参数计算方法同根际土壤跳虫。

表1 土壤跳虫功能性状特征值(Makkonen et al., 2011)

Table 1 Functional trait values of soil Collembola (Makkonen et al., 2011)

功能性状类型 Type of functional trait	钩圆蛭属 <i>Bourletiella</i>	球角蛭属 <i>Mitchellania</i>	长蛭属 <i>Entomobrya</i>	棘蛭属 <i>Protaphorura</i>	德蛭属 <i>Desoria</i>
体长 Body length/mm	1.20	7.59	9.50	3.00	7.00
体宽 Body width/mm	1.00	0.00	1.00	0.00	0.50
触角与体长的比值 Ratio of tentacle and body length	0.80	0.15	0.63	0.11	0.23
栖息环境 Habit	1.00	0.00	1.00	0.00	0.50

1.2.4 土壤环境因子的测定

采用烘干法测定土壤质量含水率,取5 g土样,放入质量为 m 的铝盒内,称其质量为 m_1 ,去盖于70℃烘箱中烘24 h,加盖后在恒温干燥箱中冷却到室温,取出盖,称其质量为 m_2 ,根据公式 $(m_1-m_2)/(m_1-m) \times 100\%$ 计算土壤质量含水率。取5 g土样,用25 mL蒸馏水制成悬浮液,振荡15 min后,静置1 h,用酸度计测定土壤pH。将50 g土壤样品充分研磨后过孔径为0.250 mm筛,取1 g过筛后的土样用元素分析仪测定其全氮和全碳含量。采用钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量。

1.2.5 刺五加根系分泌物的测定

随机选择1个样方,将样方内刺五加植株拔出,采用抖根法先将较大土块抖下,再将附着在根表面的土壤刷下,混匀后取约30 g装入自封袋,于-4℃保鲜箱内保存带回实验室,-4℃下储存。准确称取5 g刺五加根系土壤,加入1 mol/L NaOH溶液20 mL,置于25℃、180 r/min下振荡12 h,再用涡旋振荡仪振荡5 min,于4℃、10 000 r/min下高速离心10 min,收集上清液,12 mol/L盐酸调节pH至2.5,用等体积乙酸乙酯萃取3次,收集上层有机相,将收集得到的有机相用旋转蒸发仪40℃下旋转蒸发至干,用5 mL甲醇溶解,溶液通过0.45 μm微孔滤膜过滤,即根系分泌物溶液,4℃下保存,用于色谱分析。称取丁香酸、水杨酸和没食子酸对照品各10 mg溶于10 mL甲醇中,精确配置成1 mg/mL的溶液。3种溶液各取1 mL,加入27 mL甲醇溶液,配置成0.1 mg/mL混合标准溶液作为母液,再按梯度稀释为0.1、0.5、1、10和20 μg/mL的混合标准溶液。

参考杨瑞秀等(2014)方法并加以改良测定根系分泌物的含量,在流动相A替换为2%冰醋酸,柱箱温度30℃条件下测定效果较好,峰值稳定。流动相A为2%冰醋酸,流动相B为甲醇;根系分泌物溶液和混合标准溶液等梯度洗脱;柱箱温度为30℃;检测波长为280 nm;流速为0.7 mL/min;进样量为10 μL。

1.3 数据分析

采用Excel 2010和SPSS 22.0进行数据统计分析,对于服从正态分布的数据,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数(LSD)法进行差异显著性分析;对于不服从正态分布的数据,进行 $\log(x+1)$ 对数转换。采用Pearson分析法(双尾检验)、Canoco for Windows 4.5软件对土壤跳虫群落特征参数与土壤环境因子进行相关性分析,刺五加根际效应、土壤环境因子与土壤跳虫群落的关系采用冗余分析,冗余分析时原始数据均进行 $\log(x+1)$ 转换,转换后的数据经499次Monte-Carlo检验分析。

2 结果与分析

2.1 土壤跳虫群落组成

6—8月根际和非根际土壤中共捕获土壤跳虫512头,隶属于5科5属,其中钩圆蛭属、球角蛭属、棘蛭属、德蛭属跳虫分别为54、70、267和70头,所占比例分别为10.55%、13.68%、52.14%和13.67%,均为优势属;长蛭属跳虫为51头,所占比例为9.96%,为常见属(表2)。

在根际土壤中,捕获棘蛭属跳虫176头,所占比例为34.37%;捕获钩圆蛭属、球角蛭属、长脚蛭属、德蛭属跳虫分别为26、37、32和31头,所占比例分别为5.08%、7.23%、6.25%和6.05%,均为常见属。在非根际土壤中,捕获棘蛭属跳虫91头,所占比例为17.77%,为优势属;捕获钩圆蛭属、球角蛭属、长脚蛭属、德蛭属跳虫分别为28、33、19和39头,所占比例分别为5.47%、6.45%、3.71%和7.62%,均为常见属(表2)。

2.2 根际效应土壤跳虫群落的影响

6月,根际土壤的跳虫总属数、个体数和Pielou均匀度指数分别为3.50、14.92和0.72,非根际土壤的跳虫总属数、个体数和Pielou均匀度指数分别为2.83、8.83和0.87,且与根际土壤的显著差异($P < 0.05$),根际和非根际土壤的Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数之间差异不显著;7月和

8月,根际与非根际的5个土壤跳虫群落参数之间均 差异不显著(图1)。

表2 刺五加根际与非根际土壤跳虫组成和所占比例

区域 Area		数量Number			合计Total	所占比例 Percentage/%
		6月June	7月July	8月August		
根际Rhizosphere	钩圆蛭属 <i>Bourletiella</i>	14	5	7	26	5.08
	球角蛭属 <i>Mitchellania</i>	22	7	8	37	7.23
	长蛭属 <i>Entomobrya</i>	20	5	7	32	6.25
	棘蛭属 <i>Protaphorura</i>	106	45	25	176	34.37
	德蛭属 <i>Desoria</i>	17	6	8	31	6.05
非根际 Non-rhizosphere	钩圆蛭属 <i>Bourletiella</i>	14	6	8	28	5.47
	球角蛭属 <i>Mitchellania</i>	18	6	9	33	6.45
	长蛭属 <i>Entomobrya</i>	2	10	7	19	3.71
	棘蛭属 <i>Protaphorura</i>	50	18	23	91	17.77
	德蛭属 <i>Desoria</i>	22	11	6	39	7.62
合计Total		285	119	108	512	100.00

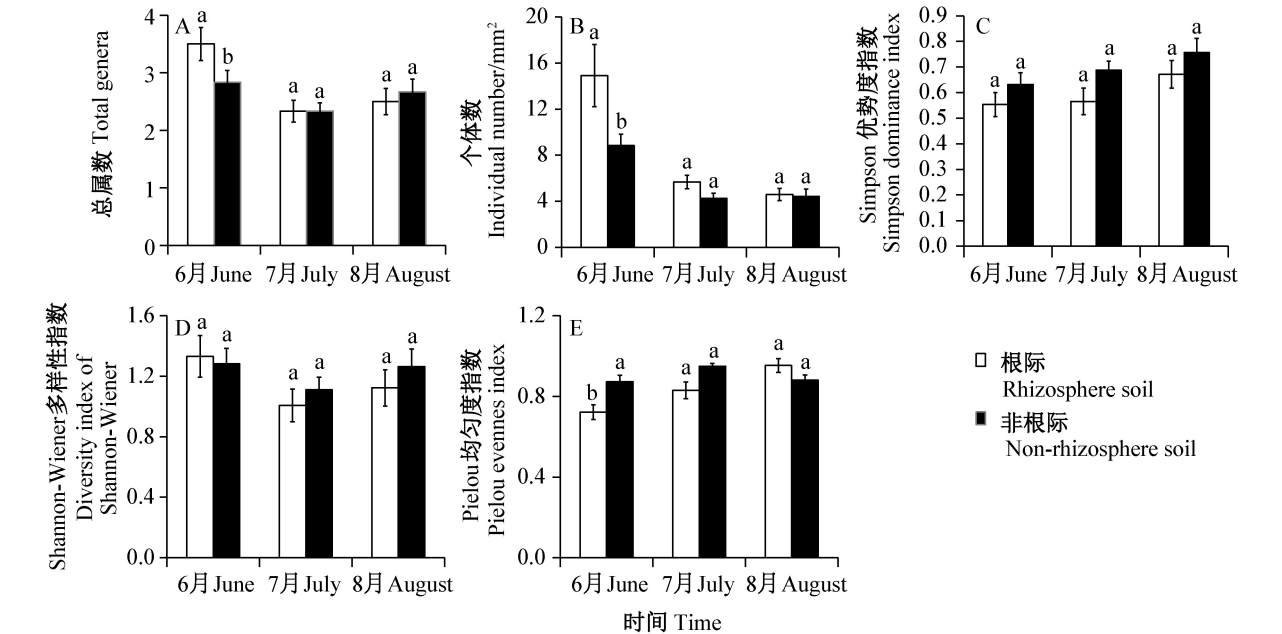


图1 刺五加根际和非根际土壤的土壤跳虫群落特征参数

Fig. 1 Community characteristic parameters of Collembola in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Acanthopanax senticosus*
图中数据为平均数±标准差。同时间不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data in the figure are mean±SE. Different lowercase letters at the same time indicate significant difference at $P<0.05$ level by using LSD test.

2.3 根际效应对土壤跳虫群落功能性状的影响

6月,根际土壤的土壤跳虫体宽、体长、触角与体长的比值、栖息范围分别为0.73 mm、4.4 mm、0.19和0.18,非根际土壤的土壤跳虫体宽、体长、触角与体长的比值、栖息范围分别为0.79 mm、5.58 mm、0.32和0.40,均显著高于根际土壤的($P<0.05$);7月和8月,根际土壤的土壤跳虫体宽、体长、触角/体长、栖息范围与非根际土壤的土壤跳虫体宽、体长、触角与体长的比值、栖息范围差异不显著(图2)。

2.4 土壤环境因子动态变化

2.4.1 土壤理化性质动态变化

6月,根际和非根际土壤的全碳含量分别为4.19 g/kg和3.79 g/kg,两者之间差异显著($P<0.05$),根际和非根际土壤的全氮含量、速效磷含量、pH和质量含水率之间无显著差异;7月,根际土壤的pH和全碳含量分别为6.04和2.44 g/kg,非根际土壤的pH和全碳含量分别是5.76和2.97 g/kg,与根际土壤的差异显著($P<0.05$),根际与非根际土壤的质量含水率、全

氮含量和速效磷含量之间差异不显著;8月,根际土壤的全碳含量、全氮含量、质量含水率和速效磷含量分别为4.95 g/kg、0.43 g/kg、24.02%和2.99 mg/kg,而非根际土壤的分别为3.59 g/kg、0.29 g/kg、30.45%和5.05 mg/kg,与根际土壤的差异显著($P<0.05$),根际与非根际土壤的pH之间差异不显著(表3)。

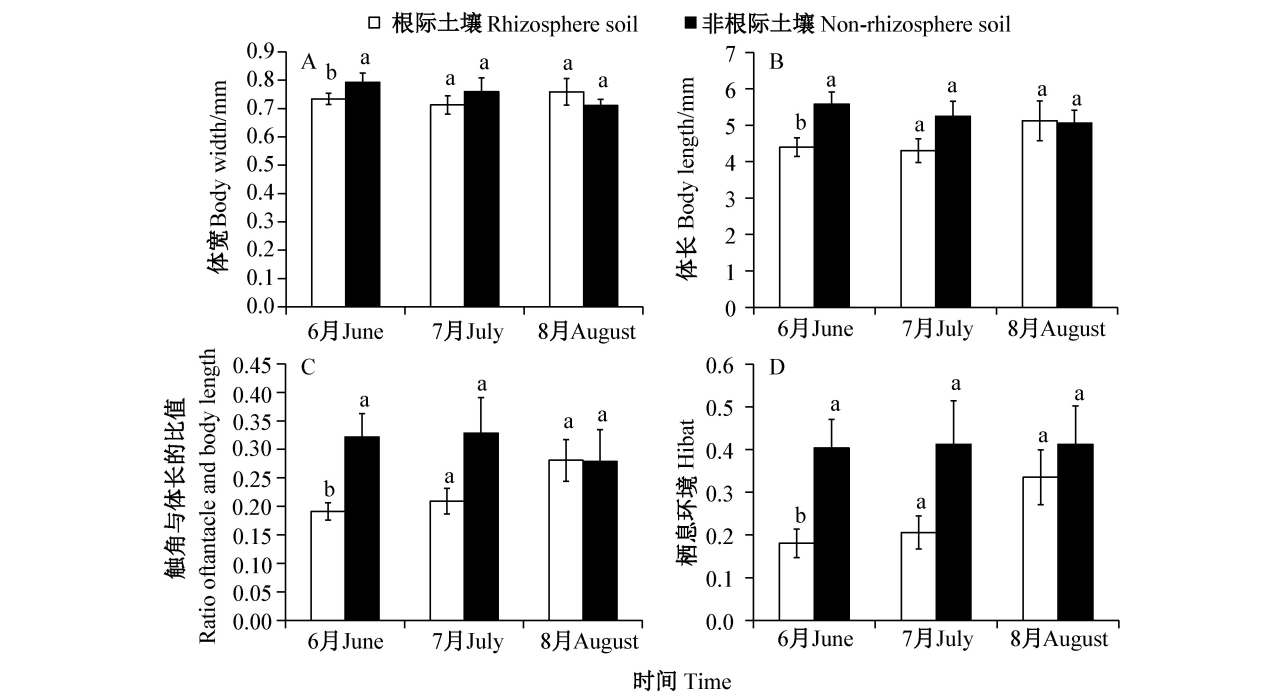


图2 刺五加根际土壤和非根际土壤中跳虫的功能性状值

Fig. 2 Functional trait values of Collembola in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Acanthopanax senticosus*

图中数据为平均数±标准差。同时间不同字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data in the figure are mean±SE. Different letters at the same time indicate significant difference at $P<0.05$ level by using LSD test.

表3 刺五加根际土壤和非根际土壤的理化性质

Table 3 Soil physical and chemical properties between rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Acanthopanax senticosus*

土壤理化性质 Physical and chemical properties of soil	6月 June		7月 July		8月 August	
	根际土壤 Rhizosphere soil	非根际土壤 Non-rhizosphere soil	根际土壤 Rhizosphere soil	非根际土壤 Non-rhizosphere soil	根际土壤 Rhizosphere soil	非根际土壤 Non-rhizosphere soil
土壤pH Soil pH	6.67±0.04 a	6.77±0.05 a	6.04±0.04 a	5.76±0.02 b	5.95±0.06 a	5.85±0.05 a
土壤质量含水率/% Soil mass moisture content	16.32±0.01 a	16.11±0.01 a	10.42±0.01 a	10.06±0.01 a	24.02±0.01 b	30.45±0.02 a
土壤全碳含量/(g/kg) Soil total carbon content	4.19±0.17 a	3.79±0.25 b	2.44±0.23 b	2.97±0.16 a	4.95±0.30 a	3.59±0.31 b
土壤全氮含量/(g/kg) Soil total nitrogen content	0.36±0.01 a	0.33±0.02 a	0.22±0.01 a	0.26±0.01 a	0.43±0.03 a	0.29±0.02 b
土壤速效磷含量/(mg/kg) Soil available phosphorus content	13.52±1.15 a	11.83±1.28 a	14.08±1.20 a	15.73±2.07 a	2.99±0.31 b	5.05±0.67 a

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different lowercase letters on the same row indicate significant difference at $P<0.05$ level by using LSD test.

2.4.2 根系分泌物动态变化

刺五加根系土壤中共检测到没食子酸、丁香酸、水杨酸3种根系分泌物,其含量均随时间呈增加趋势,7月和8月土壤中水杨酸含量分别为1.94 mg/mL和2.20 mg/mL,两者之间差异不显著,但均显著高

于6月($P<0.05$),没食子酸含量和丁香酸含量在3个月之间无显著差异(表4)。

2.5 土壤环境因子与土壤跳虫群落的关系分析

2.5.1 Pearson相关性分析

在根际土壤中,土壤pH与跳虫总属数、个体数

呈极显著正相关($P<0.01$), 土壤 pH 与 Pielou 均匀度指数呈显著负相关($P<0.05$, 表 5)。非根际土壤中, 土壤跳虫个体数与土壤 pH 呈极显著正相关($P<0.01$, 表 5)。

表 4 不同时间土壤中 3 种刺五加根系分泌物的含量
Table 4 Contents of three soil root exudates of *Acanthopanax senticosus* at different time points

分泌物种类 Type of exudate	6 月 June	7 月 July	8 月 August
没食子酸含量 Gallic acid content/(mg/mL)	0.47±0.01 a	0.48±0.02 a	0.49±0.02 a
丁香酸含量 Syringic acid content/(mg/mL)	5.90±0.28 a	6.46±0.23 a	6.68±0.24 a
水杨酸含量 Salicylic acid content/(mg/mL)	1.21±0.05 b	1.94±0.06 a	2.20±0.15 a

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different lowercase letters on the same row indicate significant difference at $P<0.05$ level by using LSD test.

表 5 土壤环境因子与土壤跳虫群落参数的 Pearson 相关性分析
Table 5 Pearson correlation analysis of soil environmental factors and soil Collembola community parameters

土壤 Soil	土壤环境因子 Environmental factor	总属数 Total no. of genera	个体数 No. of individual	Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
根际土壤 Rhizosphere soil	土壤 pH Soil pH	0.47**	0.55**	-0.18	0.25	-0.35*
	土壤质量含水率 Soil mass moisture content	0.14	-0.05	0.28	0.22	0.36
	土壤全碳含量 Soil total carbon content	-0.06	-0.21	0.24	0.01	0.15
	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	-0.02	-0.20	0.29	0.08	0.20
	土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	0.07	0.26	-0.20	0.01	-0.13
	土壤 pH Soil pH	0.31	0.74**	-0.27	0.19	-0.26
	土壤质量含水率 Soil mass moisture content	0.28	-0.05	0.28	0.27	0.04
非根际土壤 Non-rhizosphere soil	土壤全碳含量 Soil total carbon content	0.26	0.14	0.17	0.23	-0.08
	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	0.21	0.25	0.04	0.16	-0.14
	土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	-0.18	-0.04	-0.22	-0.20	-0.14

*, ** 分别表示在 $P<0.05$ 或 $P<0.01$ 水平显著相关。*, ** indicates significant correlation at $P<0.05$ or $P<0.01$ level, respectively.

2.5.2 冗余分析

棘蛭属和钩圆蛭属跳虫与土壤 pH、速效磷含量呈正相关, 与土壤质量含水率、丁香酸含量呈负相关; 球角蛭属跳虫与土壤丁香酸含量、水杨酸含量、没食子酸含量呈负相关; 德蛭属跳虫与土壤 pH 呈正相关, 与土壤丁香酸含量、水杨酸含量、没食子酸含量呈负相关; 长蛭属跳虫与土壤 pH、速效磷含量、丁香酸含量、水杨酸含量和没食子酸含量呈正相关, 与土壤质量含水率呈负相关(图 3)。

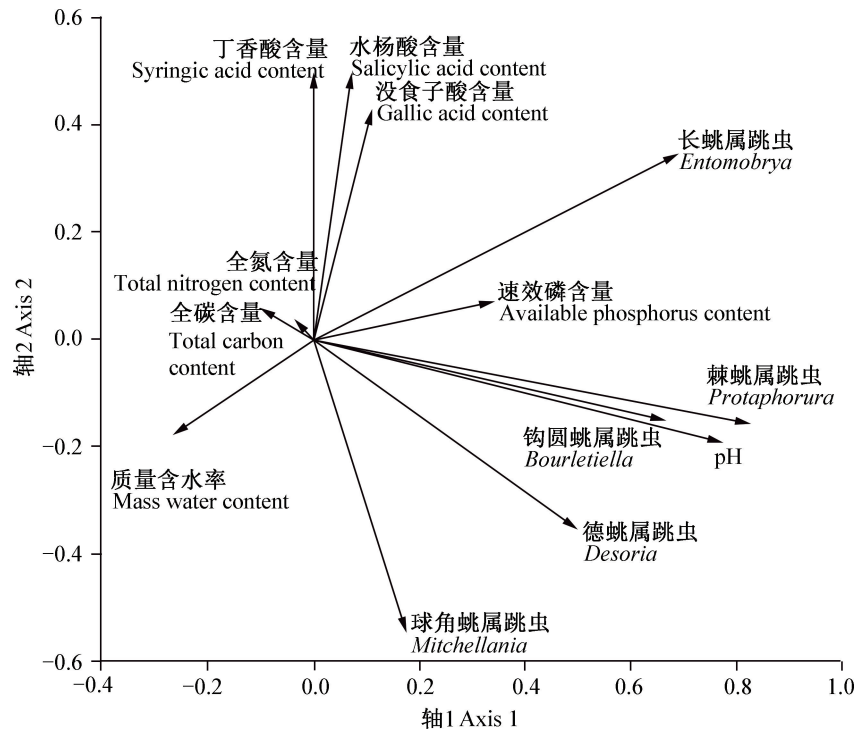
3 讨论

本研究结果表明, 6 月刺五加根际土壤跳虫总

属数和个体数等群落特征参数和功能性状值显著高于非根际土壤, 究其原因是刺五加处于营养生长阶段, 生理活动旺盛并向土壤中释放各类分泌物, 吸引微生物在根系聚集(袁仁文等, 2020), 为跳虫提供食物资源(Sabais, 2012), 同时对土壤跳虫群落可能有不利影响的没食子酸、丁香酸、水杨酸 3 种根系分泌物含量较低, 土壤中各环境因子都处于适宜水平, 适合跳虫生长发育, 而棘蛭属跳虫个体数明显高于其它属, 导致根际土壤跳虫群落分布不均匀, 致使根际土壤跳虫 Pielou 均匀度指数和功能性状值显著低于非根际。7 月刺五加根际和非根际土壤的跳虫群落特征参数和功能性状值之间均无显著差异, 但 7 月

根际和非根际土壤跳虫总属数和个体数均减少,可能是因为土壤中各类环境因子处于较低水平,土壤养分含量降低,同时对土壤跳虫群落可能产生不利影响的土壤没食子酸、丁香酸、水杨酸3种根系分泌物含量升高,导致土壤跳虫总属数减少。Cole et al. (2004)研究发现土壤养分降低会使土壤动物群落组成和多度减少,与本研究结果一致。8月,刺五加根际和非根际土壤跳虫群落特征参数和功能性状值之

间无显著差异,根际效应不显著,主要有2个方面原因,一方面可能是影响土壤跳虫群落的3种根系分泌物含量升高,另一方面可能是温度(29℃)、湿度(22%)等过高,邱军和傅荣恕(2004)在研究土壤温湿度对跳虫数量的影响时发现,土壤跳虫生长的最适温湿度分别为24℃和16%,过高和过低都会降低跳虫群落结构多样性和功能性状值。



物种与环境因子之间的夹角为锐角、钝角和直角时,分别表示正相关、负相关和不相关性。箭头长度代表该因子所占比,箭头越长影响越大。The relationships between species and environmental factors are represented by the angle, acute, obtuse and right angles show positive correlation, negative correlation and irrelevance. The length of the arrow represents the proportion of the factor, and the longer the arrow, the greater the impact.

图3 土壤环境因子与土壤跳虫群落的冗余分析排序图

Fig. 3 Sorting diagram of soil Collembola communities and soil environmental factors based on redundancy analysis

根际效应和土壤环境因子在土壤跳虫群落构建中有显著作用。处于不同生长期的刺五加,其根系分泌物的种类和含量有所不同,从而使土壤中各类元素含量发生改变,进而使土壤跳虫群落结构发生变化,因此不同生长期的刺五加是影响土壤跳虫群落结构的主要因素,同时土壤pH和温湿度也是影响土壤跳虫群落结构的重要因素。Fujii et al. (2014)研究结果也表明,土壤跳虫群落特征参数与土壤全碳含量、速效磷含量和pH正相关;肖靖秀等(2016)研究发现小麦根系分泌物含量随着生长期推移而逐渐增加,结合本研究结果可知,刺五加在6月处于营

养生长阶段时,根际效应显著,7月和8月处于生殖生长阶段,根际效应不显著,说明3种根系分泌物对土壤跳虫群落构成有抑制作用;Nielsen et al. (2015)和韩慧莹等(2017)研究结果表明,土壤跳虫群落结构与土壤温湿度呈正相关,即土壤温湿度适宜时,跳虫群落结构复杂,种类和数量较为丰富,反之则群落结构单一,数量较少,与本研究结果一致。

植物根系、土壤微生物和土壤动物之间存在复杂的相互作用关系,它们共同促进土壤中物质循环以及能量流动,为植物生长提供所需的养分(董炜华等,2016)。本研究发现,刺五加处于营养生长阶段

时,根际效应和土壤环境因子是控制跳虫群落组成和数量的主要因素;处于生殖阶段生长时,pH、温湿度等土壤环境因子是控制跳虫群落组成和数量的主要因素,此时根际效应不显著。但本试验研究数据仅是采集刺五加6—8月生长期数据,在时间和空间上有一定的局限性,需进行整个生长期的试验,并进一步探究其它环境因子和根系分泌物对土壤跳虫群落结构的影响。

参 考 文 献 (References)

- CHEN JX, MA ZC, YAN HJ, ZHANG F. 2007. Roles of springtails in soil ecosystem. *Biodiversity Science*, 15(2): 154–161 (in Chinese) [陈建秀, 麻智春, 严海娟, 张峰. 2007. 跳虫在土壤生态系统中的作用. *生物多样性*, 15(2): 154–161]
- COLE L, DROMPH KM, BOAGLIO V, BARDGETT RD. 2004. Effect of density and species richness of soil mesofauna on nutrient mineralisation and plant growth. *Biology and Fertility of Soils*, 39: 337–343
- DENG X, SONG XS, YIN DC, SONG RQ, ILAN C, MA XQ, YU WJ. 2014. Biocontrol and promoting effect of *Trichoderma* strains on *Acanthopanax senticosus* and *Schisandra chinensis* seedlings. *Journal of Jilin Agricultural University*, 36(2): 164–170 (in Chinese) [邓勋, 宋小双, 尹大川, 宋瑞清, ILAN C, 马晓乾, 遇文婧. 2014. 引进木霉菌株对药用植物刺五加和五味子苗木的抗病促生作用. *吉林农业大学学报*, 36(2): 164–170]
- DONG WH, LI XQ, SONG Y. 2016. Role of soil fauna on soil organic matter formation. *Soils*, 48(2): 211–218 (in Chinese) [董炜华, 李晓强, 宋扬. 2016. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用. *土壤*, 48(2): 211–218]
- FILSER J. 2002. The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil: Proceedings of the Xth International Colloquium on Apterygota, České Budějovice 2000: apterygota at the beginning of the Third Millennium. *Pedobiologia*, 46(3/4): 234–245
- FUJII S, SAITOH S, TAKEDA H. 2014. Effects of rhizospheres on the community composition of Collembola in a temperate forest. *Applied Soil Ecology*, 83: 109–115
- GAO Y. 2011. Research on the resources and endophytic fungi of *Acanthopanax senticosus* in Heilongjiang Province. Master Thesis. Jiamusi: Jiamusi University (in Chinese) [高原. 2011. 黑龙江省刺五加资源及内生真菌的研究. 硕士学位论文. 佳木斯: 佳木斯大学]
- HAN HY, YIN XQ, KOU XC. 2017. Community characteristics of soil fauna in the low-mountain of the Changbai Mountains and its respond to the change of environmental factors. *Acta Ecologica Sinica*, 37(7): 2197–2205 (in Chinese) [韩慧莹, 殷秀琴, 寇新昌. 2017. 长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应. *生态学报*, 37(7): 2197–2205]
- HAN J, BIAN LQ, LIU XJ, ZHANG F, ZHANG YR, YU N. 2014. Effects of *Acanthopanax senticosus* polysaccharide supplementation on growth performance, immunity, blood parameters and expression of pro-inflammatory cytokines genes in challenged weaned piglets. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(7): 1035–1043
- HARSH PB, SHAIL K. 2010. Catechin secretion & phytotoxicity. *Communicative & Integrative Biology*, 3(5): 468–470
- HUANG LW, WEN J, REN JX, YANG ZL. 2017. Advances in research on plant allelopathy. *Modern Horticulture*, (12): 18–19 (in Chinese) [黄良伟, 文杰, 任建行, 杨泽良. 2017. 植物化感作用研究进展. *现代园艺*, (12): 18–19]
- HUANG YM. 2004. Research progress on community diversity of soil invertebrate. *Journal of West China Forestry Science*, 33(3): 63–68 (in Chinese) [黄玉梅. 2004. 土壤动物群落多样性研究进展. *西部林业科学*, 33(3): 63–68]
- LI J, JIANG XM, YIN HJ, YIN CY, WEI YH, LIU Q. 2014. Root exudates and soil microbes in three *Picea asperata* plantations with different stand ages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(2): 325–332 (in Chinese) [李娇, 蒋先敏, 尹华军, 尹春英, 魏宇航, 刘庆. 2014. 不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物. *应用生态学报*, 25(2): 325–332]
- LIN YH, JIA XD, XU YP, LI HR, LIU XS, XU YB, WEI CL, LIU SZ, WANG LZ. 2015. Ground-dwelling soil animal community and niche analysis of a typical forest swamp in Daxinganling Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(12): 53–62 (in Chinese) [林英华, 贾旭东, 徐演鹏, 李慧仁, 刘学爽, 徐永波, 韦昌雷, 刘三章, 王立中. 2015. 大兴安岭典型森林沼泽类型地表土壤动物群落与生态位分析. *林业科学*, 51(12): 53–62]
- LIU J, GAO MX, MA YL, SUN X, ZHU XY, ADL SM, WU DH. 2019. Spatial and environmental factors are minor structuring forces in a soil Collembola metacommunity in a maize agroecosystem. *Pedobiologia*, 76: 153–160
- LIU YX, LI X, CAI LT, ZHANG H, SHI JX. 2016. Identification of phenolic acids in tobacco root exudates and their role in the growth of rhizosphere microorganisms. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 22(2): 136–146 (in Chinese) [刘艳霞, 李想, 蔡刘体, 张恒, 石俊雄. 2016. 烟草根系分泌物酚酸类物质的鉴定及其对根际微生物的影响. *植物营养与肥料学报*, 22(2): 136–146]
- MICHALET S, ROHR J, WARSHAN D, BARDON C, ROGGY JC, DOMENACH AM, CZARNES S, POMMIER T, COMBOURIEU B, GUILLAUMAUD N. 2013. Phytochemical analysis of mature tree root exudates in situ and their role in shaping soil microbial communities in relation to tree N-acquisition strategy. *Plant Physiology and Biochemistry*, 72: 169–177
- MAKKONEN M, BERG MP, VAN HAL JR, CALLAGHAN TV, PRESS MC, AERTS R. 2011. Traits explain the responses of a sub-arctic Collembola community to climate manipulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(2): 377–384
- NI Z. 2015. Study on recovery potential of soil springtails diversity and management countermeasures of degraded grassland in Songnen plain. Ph. D Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese) [倪珍. 2015. 松嫩平原退化草地土壤跳虫多样性恢复潜力及管理对策研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学]

- NIELSEN UN, PRIOR S, DELROY B, WALKER JKM, ELLSWORTH DS, POWELL JR. 2015. Response of belowground communities to short-term phosphorus addition in a phosphorus-limited woodland. *Plant and Soil*, 391: 321–331
- QIU J, FU RS. 2004. The effects of temperature and soil water content for the number of Oribatida and Collembola. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 19(4): 72–74 (in Chinese) [邱军, 傅荣恕. 2004. 土壤温湿度对甲螨和跳虫数量的影响. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 19(4): 72–74]
- RZESZOWSKI K, ZADROŻNY P, NICIA P. 2017. The effect of soil nutrient gradients on Collembola communities inhabiting typical urban green spaces. *Pedobiologia*, 6(3): 15–24
- SABAIS ACW. 2012. Collembola in a plant diversity gradient: interactions between the aboveground and belowground system. Ph. D Thesis. Darmstadt: Technische Universität
- SHEN H, YAN XL, ZHAO M, ZHENG SL, WANG XR. 2002. Exudation of organic acids in common bean as related to mobilization of aluminum and iron-bound phosphates. *Environmental and Experimental Botany*, 48: 1–9
- SILVA PMD, BERG MP, SERRANO ARM, DUBS F, SOUSA JP. 2012. Environmental factors at different spatial scales governing soil fauna community patterns in fragmented forests. *Landscape Ecology*, 27(9): 1337–1349
- TU ZW, ZHOU WW, SHAN Q, XIN N, HOU WB. 2011. Research progress on *Acanthopanax senticosus*. *Drug Evaluation Research*, 34(3): 213–216 (in Chinese) [涂正伟, 周渭渭, 单洪, 辛宁, 侯文彬. 2011. 刺五加的研究进展. *药物评价研究*, 34(3): 213–216]
- WANG BF, FAN CM, YI JQ, WU FC, WANG DM, SONG XY. 2019. Effects of planting transgenic insect-resistant maize with *cry1Ac* gene Bt-799 on the composition structure of soil fauna. *Journal of Plant Protection*, 46(1): 167–174 (in Chinese) [王柏凤, 范春苗, 尹俊琦, 武奉慈, 王大铭, 宋新元. 2019. 转 *cry1ac* 基因抗虫玉米 bt-799 种植对土壤动物群落结构的影响. *植物保护学报*, 46(1): 167–174]
- WANG XF, MAO ZX, XU JZ, CHANG L, WU DH. 2016. Responses of soil nematode community composition and diversity to rhizosphere effects in a soybean field. *Acta Ecologica Sinica*, 36(16): 5256–5262 (in Chinese) [王雪峰, 毛之夏, 徐济贵, 常亮, 吴东辉. 2016. 根际效应对大豆田土壤线虫群落组成及多样性的影响. *生态学报*, 36(16): 5256–5262]
- WANG XW, GUO WQ, ZHAO JY, SHE LY, XI N, HE N, WANG SS, YUAN LJ, XIE YY. 2018. Study on the secondary metabolites of an endophytic *Streptomyces* sp. CWJ-256 isolated from *Acanthopanax senticosus*. *Chinese Medicinal Biotechnology*, 13(5): 26–33 (in Chinese) [王新位, 郭文强, 赵建元, 余利岩, 席楠, 何宁, 王珊珊, 袁立杰, 解云英. 2018. 刺五加内生放线菌 *Streptomyces* sp. CWJ-256 次生代谢产物研究. *中国医药生物技术*, 13(5): 26–33]
- WU LP, YIN CR, HAN CF, BAI LL, JIN EH, KANG CK, GUO DS, FU Y. 2018. Microbial transformation and the mechanism of *Panax notoginsenosides* by strain MB6. *Ginseng Research*, (4): 20–23 (in Chinese) [武伦鹏, 尹成日, 韩春峰, 白龙律, 金恩华, 康辰凯, 郭德山, 付玉. 2018. 菌株 MB6 对三七总皂苷的微生物转化及其转化机理的研究. *人参研究*, (4): 20–23]
- XIAO JX, ZHENG Y, TANG L, WANG G, DONG Y. 2016. Variation of organic acids and phenolic acids in the rhizosphere of wheat and broad bean in different growth periods. *Acta Pedologica Sinica*, 53(3): 685–693 (in Chinese) [肖靖秀, 郑毅, 汤利, 王戈, 董艳. 2016. 间作小麦蚕豆不同生长期根际有机酸和酚酸变化. *土壤学报*, 53(3): 685–693]
- YANG RX, GAO ZG, YAO Y, LIU X, SUN SQ, WANG Y. 2014. Allelopathic effect of phenolic compounds of melon root exudates on *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(8): 2355–2360 (in Chinese) [杨瑞秀, 高增贵, 姚远, 刘限, 孙淑清, 王莹. 2014. 甜瓜根系分泌物中酚酸物质对尖孢镰孢菌的化感效应. *应用生态学报*, 25(8): 2255–2360]
- YIN WY. 1992. Subtropical soil animals in China. Beijing: Science Press, pp. 414–415 (in Chinese) [尹文英. 1992. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, pp. 414–415]
- YIN WY. 2001. A brief review and prospect on soil zoology. *Bulletin of Biology*, 36(8): 1–3 (in Chinese) [尹文英. 2001. 土壤动物学研究的回顾与展望. *生物学通报*, 36(8): 1–3]
- YUAN RW, LIU L, ZHANG R, FAN SY. 2020. The interaction mechanism between plant rhizosphere secretion and soil microbe: a review. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 36(2): 26–35 (in Chinese) [袁仁文, 刘琳, 张蕊, 范淑英. 2020. 植物根际分泌物与土壤微生物互作关系的机制研究进展. *中国农学通报*, 36(2): 26–35]
- ZHANG D. 2015. Study on the mechanism of continuous cropping obstacles based on allelopathy of *Coptis chinensis* Franch and changes in microbial community structure. Ph. D Thesis. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine (in Chinese) [张丹. 2015. 基于黄连化感物质与微生物群落结构变化的连作障碍机制研究. 博士学位论文. 成都: 成都中医药大学]
- ZHU YH, LI KZ, LU L. 2012. Rhizosphere soil fauna and its effects on plant growth: a review. *Chinese Journal of Ecology*, 31(10): 2688–2693 (in Chinese) [朱永恒, 李克中, 陆林. 2012. 根际土壤动物及其对植物生长的影响. *生态学杂志*, 31(10): 2688–2693]

(责任编辑:张俊芳)