

冬小麦休耕对土壤动物群落及其摄食活性的影响

李琦聪, 张思宇, 贾梦圆, 李刚, 修伟明, 杨殿林, 赵建宁

引用本文:

李琦聪, 张思宇, 贾梦圆, 李刚, 修伟明, 杨殿林, 赵建宁. 冬小麦休耕对土壤动物群落及其摄食活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 121-131.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0229>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

退化喀斯特生态恢复过程对土壤微节肢动物群落多样性的影响

李宜蓉, 龙健, 李娟, 刘灵飞, 廖洪凯, 王显, 杨睿

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 310-318 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0728>

咸水灌溉棉田休耕期土壤胞外酶活性和微生物多样性研究

梁悦萍, 李科江, 张俊鹏, 王广帅, 高阳, 孙景生, 段爱旺

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 732-740 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1514>

嘉兴河网大型底栖动物与氮磷、重金属的相关分析

黄子晏, 杜士林, 张亚辉, 张瑾, 孟睿, 何连生

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1787-1798 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0506>

周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响

夏梓泰, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 99-106 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0572>

规模猪场机械通风育肥舍氨气产生及排放研究

刘杨, 尚斌, 董红敏, 陶秀萍, 徐文倩, 杨培媛

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2058-2065 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0178>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李琦聪, 张思宇, 贾梦圆, 等. 冬小麦休耕对土壤动物群落及其摄食活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 121-131.

LI Q C, ZHANG S Y, JIA M Y, et al. Effects of fallow winter wheat on soil fauna community and feeding activity [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 121-131.



开放科学 OSID

冬小麦休耕对土壤动物群落及其摄食活性的影响

李琦聪^{1,2}, 张思宇², 贾梦圆², 李刚², 修伟明², 杨殿林², 赵建宁^{2*}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 农业农村部产地环境污染防治重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191)

摘要:为明确农田土壤动物对不同耕作制度的响应,本研究以华北小麦田土壤微节肢动物为研究对象,探究休耕对土壤微节肢动物群落及其摄食活性的影响。试验设置不播种作物的样方作为休耕处理,正常播种作为不休耕处理,分析处理间和不同土层的土壤温湿度时空差异,并利用诱饵薄片法(Bait-Lamina Test, BLT)原位解析土壤动物的摄食活性。结果表明:休耕与不休耕处理中的土壤微节肢动物均以真螨目为优势类群,其占总丰度的89%,并且具有明显的表聚效应。此外,休耕对不同土层深度土壤微节肢动物群落的影响不一致,0~5 cm土层、不休耕处理中的土壤微节肢动物丰度显著增加,约为休耕处理的4.4倍;5~10 cm土层、不休耕处理的微节肢动物数量相较于休耕处理增长了约46%。相关性分析显示,土壤微节肢动物摄食活性与土壤温湿度和不同种植模式均存在显著正相关关系。从小麦的拔节期到成熟期,休耕处理中土壤微节肢动物的摄食活性均显著高于不休耕处理,且在土壤湿度最高的抽穗期达到最大。研究表明,休耕显著降低了0~10 cm深度土壤微节肢动物的数量和多样性,但提高了其摄食活性,土壤微节肢动物群落的摄食活性主要受土壤湿度的影响。

关键词:农田土壤;微节肢动物;休耕;摄食活性;温度;湿度;小麦

中图分类号:S154.5;S512.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2023)01-0121-11 **doi:**10.11654/jaes.2022-0229

Effects of fallow winter wheat on soil fauna community and feeding activity

LI Qicong^{1,2}, ZHANG Siyu², JIA Mengyuan², LI Gang², XIU Weiming², YANG Dianlin², ZHAO Jianning^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Original Agro-Environmental Quality of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-Environmental and Agro-Product Safety, Tianjin 300191, China)

Abstract: To clarify the response of farmland soil fauna to different tillage regimes, this study took soil microarthropods in North China wheat fields as the research object to explore the effects of fallow on soil microarthropod communities and their feeding activities. In the experiment, the plots without sowing crops were set as the fallow treatment, and normal sowing was regarded as the non-fallow treatment. The spatial and temporal differences in soil temperature and humidity between treatments and different soil layers were analyzed, and the feeding activities of soil fauna were analyzed *in situ* using the Bait-Lamina test (BLT). The results showed that soil microarthropods in the fallow and non-fallow treatments were dominated by Acariformes, accounting for 89% of the total abundance, and had obvious surface aggregation effects. In addition, fallow had inconsistent effects on the soil microarthropod communities at different soil depths. In the 0-5 cm soil layer, the abundance of soil microarthropods in the non-fallow treatment increased significantly to approximately 4.4 times that of

收稿日期:2022-03-10 录用日期:2022-05-10

作者简介:李琦聪(1997—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,从事生物多样性与生态农业研究。E-mail:13946087229@163.com

*通信作者:赵建宁 E-mail:zhaojn2008@163.com

基金项目:中国农业科学院科技创新工程项目;农业农村部环境保护科研监测所基础前沿项目(2021-jcqyrw-xwm)

Project supported: The Technology Innovation Program of the Chinese Academy of Agricultural; Fundamental Cutting-edge Projects of Research Institute (2021-jcqyrw-xwm)

the fallow treatment. In the 5–10 cm soil layer, the number of microarthropods in the non-fallow treatment increased by approximately 46% compared to the fallow treatment. Correlation analysis showed significant positive correlation between soil microarthropod feeding activity and soil temperature, humidity and different planting patterns. From the jointing stage to the maturity stage of wheat, the feeding activity of soil microarthropods in the fallow treatment was significantly higher than that in the non-fallow treatment, and reached maximum at the heading stage with the highest soil humidity. This study showed that fallow significantly reduced the number and diversity of soil microarthropods at 0–10 cm depth but increased their feeding activity. The feeding activity of soil microarthropod communities was mainly affected by soil humidity.

Keywords: farmland soil; microarthropods; fallow; feeding activity; temperature; humidity; wheat

华北地区是我国人均水资源占有量最少的地区, 每年超采地下水约 100 亿 m^3 , 超过全国地下水超采量的 60%^[1]。农业农村部、水利部等部门联合印发的《华北地区地下水超采综合治理行动方案》中明确指出, 要通过强化节水、实行禁采限采、调整农业种植结构, 在地下水超采漏斗区实行“一季自然休耕, 一季雨养种植模式”的季节性休耕政策^[2], 切实解决华北地区地下水超采问题。小麦是华北地区主要的高耗水作物^[3], 适当压减地下水超采区冬小麦的种植面积有利于华北平原地下水位的恢复^[4]。2016—2021 年, 华北地区压减冬小麦种植面积累计超过 67 万 hm^2 , 累计压采地下水超过 50 亿 m^3 ^[5], 地下水位连年恢复, 区域生态环境得到明显改善。但休耕在减少区域用水量的同时也会改变土壤环境, 进而影响土壤生物多样性^[6]。

土壤生物是土壤健康的基础, 农业的可持续发展离不开土壤生物发挥积极作用^[7]。土壤动物是生态系统物质循环的重要组成部分, 对土壤生态系统中土壤有机质的分解, 尤其是对植物凋落物的分解和土壤养分矿化等起重要的调节作用^[8]。土壤微节肢动物对生存环境的变化非常敏感^[9], 一些研究表明土壤的温度和湿度通常是影响土壤微节肢动物群落多样性和活动的首要环境因素^[10–12]。Kardol 等^[13]的研究结果表明弹尾目的物种丰度与土壤湿度呈正相关, 与土壤温度呈负相关, Rozen 等^[14]的试验证明土壤温湿度的变化能够影响土壤动物的垂直分布。另外, 有研究表明植被的组成通过影响土壤温湿度和土壤养分进而改变土壤微节肢动物群落组成^[15]。如无作物覆盖的地块, 土壤水分蒸发速率加快, 导致土壤含水量下降^[16], 进而使土壤微节肢动物的数量和群落结构发生变化。Xiong 等^[17]的研究证明林下植被的去除改变了土壤动物的生存环境, 间接影响其活动。

土壤微节肢动物的摄食活性被视为是土壤养分周转的一个重要指标^[18], 其通过改变土壤结构间接加速养分循环^[19]。Von Törne 在 1990 年首次提出使用诱

饵薄条法 (Bait-Lamina Test, BLT) 来评估土壤动物的摄食活动^[20]。BLT 法具有价格低廉、检测速度快、无需破坏土层且在原位土壤即可实现等优点^[21], 已形成标准化的评估模式 (ISO18311:2018), 并多次被推荐纳入土壤健康指标体系^[22]。曾有研究报道称土壤动物在不同林地间的摄食活动受土壤环境影响显著^[23], 如 Wall 等^[24]的试验证明土壤动物对湿热带生物群落的分解有积极影响, Simpson 等^[25]在温带森林中的试验结果表明较高的土壤湿度增加了土壤微节肢动物的摄食活性。另外, 也有研究证实气候和降雨的变化能够影响森林或草地生态系统中土壤微节肢动物的摄食活性^[8, 26–27]。但基于农田尺度探讨土壤微节肢动物摄食活性的研究较为少见, 关于小麦休耕对土壤动物群落组成的影响, 尤其是对摄食活动的影响研究则更加缺乏。本研究以华北平原小麦田中土壤微节肢动物为研究对象, 探究休耕对土壤微节肢动物群落及其摄食活性的影响, 明确土壤微节肢动物群落及其摄食活性对休耕及休耕带来的土壤环境变化的响应特征, 为区域农业生产及种植制度调整提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验样地位于中国农业科学院武清试验站 (39° 21' N, 117° 12' E)。该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温 12 °C, 年均降水量 600 mm, 相对湿度 53.5%。耕作方式为冬小麦–夏玉米轮作, 土壤类型为潮土。供试土壤基本理化性质: pH 值 8.24, 有机质含量 18 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 0.63 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量 0.79 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷含量 18.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验选取 4 个常规施肥的小区, 每个小区面积为 96 m^2 (12 m × 8 m), 在每个小区中心位置设置两块 1 m^2 的样方, 其中一块不播种作物作为休耕处理, 另

一块正常播种作为不休耕处理,即休耕和不休耕2个处理,共8个样方。所有样地均按照氮 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、钾 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 进行施肥,其中全量的磷肥(P_2O_5)、钾肥(K_2O)和60%的氮肥(尿素)作为基肥于播种前施入,40%的氮肥在小麦返青期作追肥施入。

1.3 样品采集与鉴定

在小麦收获前,使用直径55 mm的土钻,分别取0~5 cm和5~10 cm的土样^[28],不休耕处理的土样在小麦行间采集,休耕处理的土样在样方内采集,每个样方取10个土芯混成一个土壤样品,去除植物残茬、石砾等杂质后装入无菌自封袋中暂存于冰盒内,随后立即带回实验室^[29]。一部分新鲜土样直接用于土壤微节肢动物的分离鉴定,一部分鲜土在4℃下保存用于土壤铵态氮和硝态氮含量的测定,剩余土样待风干后过2 mm筛用于测定其他土壤理化性质。采用干漏斗法(Tullgren法)对土壤样品中的中小型节肢动物进行分离,分离出的土壤动物保存在75%的乙醇溶液中^[30]。参照《中国土壤动物检索图鉴》,在OlympusSZX16荧光体视显微镜下进行鉴别与分类^[31],螨类和跳虫鉴定到科,其他物种鉴定到目,并统计个体数量。

土壤pH使用MP511型pH计测定,水土比为2.5:1;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-比色法测定^[30];土壤含水量是将样品在105℃下烘干48 h后测定;土壤经 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙浸提,使用连续流动分析仪(AA3, SEAL Analytical, 德国)测定铵态氮和硝态氮含量;土壤有效磷采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定^[32]。

1.4 土壤温湿度测定

从2021年4月1日开始直到小麦收获,在地表、地下5 cm、地下10 cm处分别埋设土壤温湿度传感器(3613THS, 美国Spectrum公司),设置每隔1 h自动采集土壤温湿度并保存一次。所测数据通过无线装置上传至主机中,本研究将全天24 h的测定结果作为数据来源进行分析。

1.5 土壤微节肢动物摄食活性的测定

在2021年4月1日—4月14日、4月28日—5月11日、5月25日—6月7日3个时间段采用诱饵薄条法原位测定土壤微节肢动物的摄食活性^[33]。诱饵选用PVC材质的穿孔塑料条,每根条带上打16个直径为1.5 mm的双锥孔用于装填饵料。每个处理的样方内放置12根诱饵条,每次共计96根。饵料为纤维素(70%)、细研磨的麦麸(25%)和活性炭(5%)的混合物^[21],三者用去离子水充分混匀并保持足够湿度时即

可装填。风干后将诱饵条插入土壤,使最上端的孔刚好位于地表下,保持14 d的接触期^[34],接触期结束时,小心地将诱饵条从土壤中取出并清除附着的土壤颗粒。将诱饵条置于光线明亮处,对整根诱饵条分两部分进行视觉评估(前8个孔表示0~5 cm,后8个孔表示5~10 cm),每个孔超过50%为空则表示已食用,仍被填满则表示未食用,以每个处理中的空孔数和全部孔数之比的平均值作为该处理的饵料消耗率。

1.6 数据统计与处理

土壤微节肢动物群落多样性分析采用Shannon-Weiner多样性指数、Pielou均匀性指数、Margalef丰富度指数法测定。

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

$$\text{Pielou 均匀性指数: } J = H/\ln S$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } D = (S-1)/\ln N$$

式中: S 为所有类群数; P_i 为第*i*个物种的多度比例; N 为全部类群的个体总数。

使用SPSS 23.0软件对不同处理的土壤理化性质、土壤微节肢动物物种组成和土壤微节肢动物摄食活性进行单因素方差分析(One-way ANOVA),采用Duncan方法进行显著性检验($P<0.05$),并对土壤温湿度和不同种植模式进行双因素交互分析。采用Canoco 4.5进行冗余分析(RDA)来评价土壤环境因子对土壤微节肢动物群落的影响。使用Excel 2010和Origin 2019处理数据并绘图。

2 结果与分析

2.1 休耕对土壤微节肢动物群落组成的影响

通过干漏斗法,由表1可知,两个处理共分离得到微节肢动物291个,隶属4纲4目27科。真螨目占总丰度的89%,其中奥甲螨科(Ooppiidae)、邦甲螨科(Banksinoma)和菌甲螨科(Scheloribates)为优势类群,分别占总个体数的24.40%、11.68%和10.31%;真卷甲螨科(Trichomonadidae)、罗甲螨科(Lohmaniidae)、全罗甲螨科(Panromecidae)和等节跳科(Isotoma)等15科为常见类群,占总个体数的49.14%;赤螨科(Erythraeidae)、矮蒲螨科(Pygmephoridae)、肉食螨科(Cheyletidae)和棘跳科(Onychiurus)等10科为稀有类群,占总个体数的4.47%。其中在不休耕处理中分离得到微节肢动物205个,在休耕处理中分离得到86个,休耕处理显著降低了土壤微节肢动物数量。0~5 cm土层,不休耕处理的土壤微节肢动物丰度约为休

耕处理的4.4倍;5~10 cm土层,不休耕处理的微节肢动物数量相较于休耕处理增长了约46%。

由表2可知,在不休耕处理中,各土层微节肢动物的多样性指数和丰富度指数分别为2.23、1.86和3.04、2.43,休耕处理的多样性指数和丰富度指数分别为1.37、1.67和1.98、2.28,在0~5 cm土层不休耕处理均与休耕处理差异显著($P<0.05$)。但两个处理的均匀度指数无显著差异。

2.2 休耕对土壤微节肢动物摄食活性的影响

不同处理中土壤微节肢动物的摄食活性差异显著(图1)。4月,不休耕处理中土壤微节肢动物摄食活性为17.2%,休耕处理中摄食活性则显著高于不休耕处理,为35.4%;5月,不休耕处理中摄食活性相较于4月有所下降,降至10.8%,而休耕处理中的摄食活性则进一步上升,达到39.3%;6月,不休耕和休耕处理中的摄食活性与上月相比均有不同程度下降,分别

表1 不同处理中土壤微节肢动物群落组成(个)
Table 1 Soil microarthropod community composition in different treatments

类群 Group	不休耕 Non-fallow		休耕 Fallow		优势度 Dominance
	0~5 cm	5~10 cm	0~5 cm	5~10 cm	
真螨目 Acariforms	109	74	24	52	+++
赤螨科 Erythraeidae			1		+
矮蒲满科 Pygmephoridae	1				+
吸螨科 Bdellidae	9	2	5	3	++
菌螨科 Anoetidae	3			6	++
巨须螨科 Cunaxidae	5	2			++
隐颚螨科 Cryptognathus		2		1	++
长须螨科 Stigmaeidae	1	2			++
肉食螨科 Cheyletidae	1				+
真卷甲螨科 Trichomonadidae	1	5	3	1	++
罗甲螨科 Lohmaniidae	4	1		1	++
全罗甲螨科 Panromecidae	1		2	1	++
上罗甲螨科 Epilohmannia	10	3		4	++
滑珠甲螨科 Acaridae		1			+
奥甲螨科 Oppiidae	23	21	5	22	+++
盾珠甲螨科 Allosuctobelba		1			+
邦甲螨科 Banksinoma	16	12	1	5	+++
菌甲螨科 Scheloribates	16	7	5	2	+++
山足甲螨科 Truncopes		4			++
角翼甲螨科 Achipteria	2			2	++
微离螨科 Microdispidae		1			+
若甲螨科 Oribatula	1	1			+
卷甲螨科 Phthiracarus	4			1	++
真罗甲螨科 Eulohmannia	11	9	2	3	++
弹尾目 Collembola	7	11		4	++
棘跳科 Onychiurus	1				+
疣跳科 Neanura				1	+
等节跳科 Isotoma	6	11		1	++
长角跳科 Entomobrya				2	+
双翅目 Diptera	2	1	3	3	++
古蛭目 Acerentomata	1				+
总计 Total	119	86	27	59	

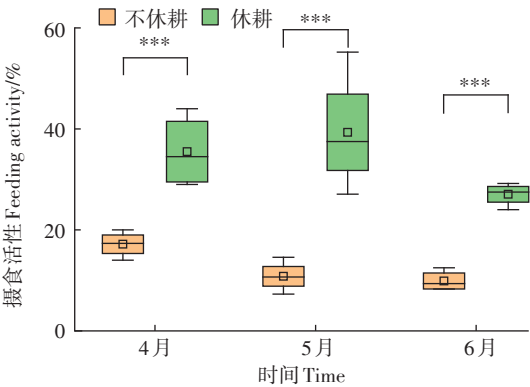
注:+++为丰度>10%,优势类群;++为1%<丰度<10%,常见类群;+为丰度<1%,稀有类群。
Note:+++ indicates abundance>10%,dominant group;++ indicates 1% < abundance <10%,common group;+ indicates abundance <1%,rare group.

表2 不同处理中土壤微节肢动物群落生态指数

Table 2 Ecological index of soil microarthropod community in different treatments

生态指数 Ecological index	不休耕(0~5 cm)	不休耕(5~10 cm)	休耕(0~5 cm)	休耕(5~10 cm)
多样性指数 Shannon-Weiner index	2.23±0.17a	1.86±0.52ab	1.37±0.39b	1.67±0.20ab
均匀度指数 Pielou index	0.95±0.10a	0.88±0.12a	0.97±0.03a	0.88±0.06a
丰富度指数 Margalef index	3.04±0.42a	2.43±0.80ab	1.98±0.41b	2.28±0.35ab

注:图中数据为平均值±标准差,相同小写字母表示处理间差异无统计学意义(方差分析采用LSD检验, $P<0.05$)。下同。
Note:The data in the figure are the mean ± standard deviation, and the same lowercase letter indicates that there was no statistical difference between treatments (analysis of variance using LSD test, $P<0.05$). The same below.



***表示在 $P<0.001$ 水平显著相关
*** represents significant correlation at $P<0.001$ level

图1 不同处理中土壤微节肢动物摄食活性
Figure 1 Feeding activity of soil microarthropods in different treatments

为9.9%和27.1%,且为各月中最低水平。综合来看,不休耕处理在各月中的平均摄食活性为13.0%,休耕处理的平均摄食活性则为36.2%,休耕处理中土壤微节肢动物的摄食活动约为不休耕处理的2.8倍。

为确定摄食活性在不同土层的差异,将剖面划分为0~5 cm和5~10 cm两个深度(图2)。研究发现4月摄食活性在不同土层间未产生显著差异;5月和6月,土壤微节肢动物的摄食活性在5~10 cm深度均要低于0~5 cm。4—6月,不休耕处理0~5 cm土层平均摄食活性为15.11%,5~10 cm土层平均摄食活性为

8.77%;休耕处理0~5 cm土层平均摄食活性为40.08%,5~10 cm土层平均摄食活性为27.62%。

2.3 休耕对土壤理化因子的影响

不休耕和休耕两个处理的土壤理化因子存在显著差异(表3)。不休耕处理中土壤pH、有效磷和硝态氮含量均显著低于休耕处理($P<0.05$),且速效养分含量随着土层深度的增加逐渐降低($P<0.05$)。0~5 cm深度,休耕处理显著降低了土壤含水量($P<0.05$),而5~10 cm深度土壤含水量在两处理间未有显著差异。

2.4 休耕对土壤温湿度的影响及其与摄食活性的交互效应

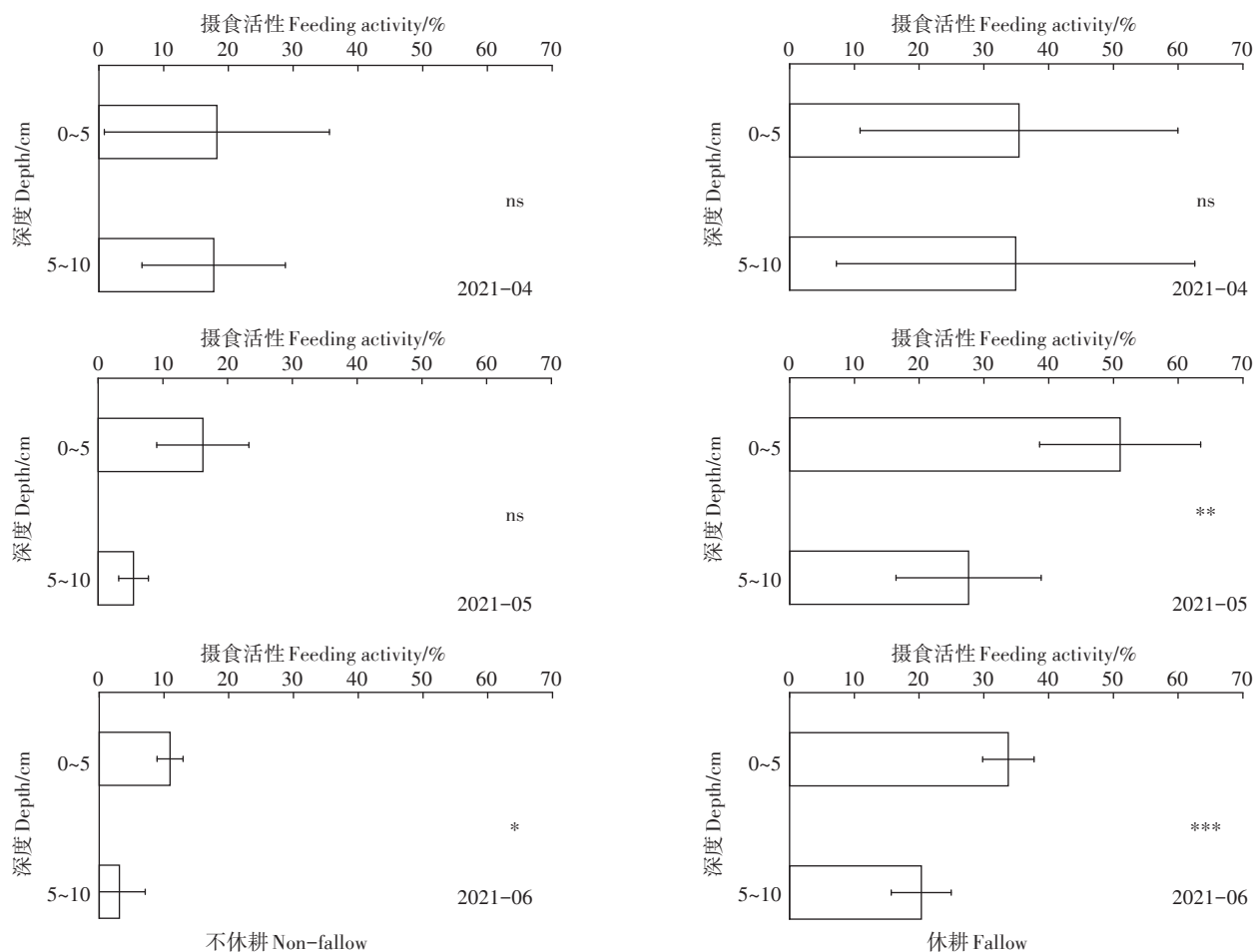
对小麦田中各处理的土壤温湿度进行统计分析,结果见图3。4月、5月和6月,不休耕处理0~5 cm深度的土壤温度分别为13.6、15.3℃和20.9℃,而5~10 cm深度在4月的土壤温度相较于0~5 cm下降0.3℃,5月和6月则分别上升0.1℃和0.6℃。休耕处理的土壤温度显著高于不休耕处理,0~5 cm深度分别为14.5、18.0℃和23.7℃,且随小麦生长期的推移,温差逐渐增大。休耕处理5~10 cm深度的土壤温度则始终低于0~5 cm深度的土壤温度。

对土壤湿度的分析发现,休耕处理0~5 cm土层的平均土壤湿度较不休耕处理降低了2.4个百分点,而5~10 cm土层湿度在两个处理间差异不显著。其中不休耕处理0~5 cm深度在4月、5月和6月的土壤平均湿度分别为11.3%、24.4%和17.4%,而5~10 cm

表3 麦田休耕土壤和不休耕土壤的理化性质

Table 3 Soil properties of fallow and non-fallow soils in wheat fields

土壤理化因子 Soil property	休耕 Fallow		不休耕 Non-fallow	
	0~5 cm	5~10 cm	0~5 cm	5~10 cm
pH	7.82±0.06ab	7.86±0.05a	7.77±0.04bc	7.74±0.03c
有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	21.46±1.77a	19.86±1.63a	20.70±0.44a	19.94±1.44a
有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	62.73±2.21a	61.96±1.06a	57.80±1.51b	57.66±1.31b
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	1.63±0.26a	1.60±0.03ab	1.38±0.05ab	1.34±0.08b
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	4.76±0.23a	4.28±0.30b	3.75±0.18c	3.54±0.19c
含水量 SM/%	12.65±1.24c	19.15±2.16a	15.32±1.75b	20.58±0.87a



*, ** and *** 分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平差异显著, ns 代表差异不显著
 *, ** and *** represent significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$ levels, respectively; ns represents no significant difference

图2 不同土层中土壤微节肢动物摄食活性

Figure 2 Feeding activity of soil microarthropods in different soil layers

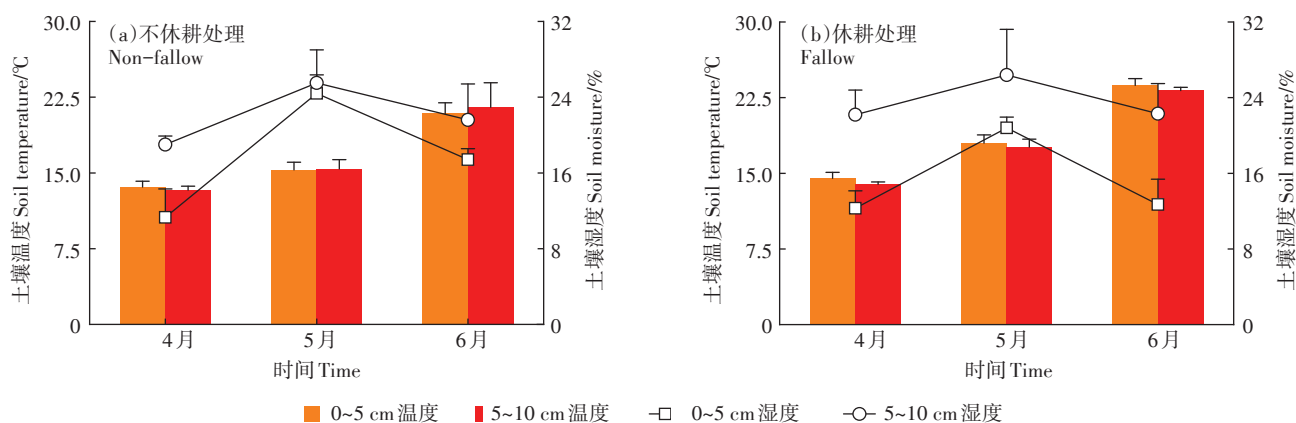


图3 小麦田土壤温、湿度变化

Figure 3 Changes of soil temperature and humidity in wheat fields

深度土壤的平均湿度为0~5 cm的1.05~1.68倍。相较于不休耕处理,休耕处理中0~5 cm土层在4月的土壤平均湿度增加了1个百分点,而在5月和6月则分别

减少了3.6个百分点和4.7个百分点,5~10 cm土层的平均湿度比不休耕高1.6个百分点。这说明休耕会显著减少表层土壤湿度。

将土壤温湿度及种植模式与土壤摄食活性进行交互分析(表4),结果发现土壤温湿度和不同种植模式均对土壤微节肢动物的摄食活性有显著影响($P<0.05$),但土壤温湿度与种植模式交互作用对摄食活动不存在显著影响。

2.5 休耕及土壤理化因子与土壤微节肢动物群落及其摄食活性的相关性分析

相关性分析结果(表5)表明,在不休耕土壤中,土壤pH与土壤微节肢动物多样性指数、均匀度指数

和丰富度指数均呈显著正相关($P<0.05$)。在休耕土壤中,土壤含水量与均匀度指数呈显著负相关($P<0.05$)。在不同处理下,土壤微节肢动物摄食活性均与土壤含水量呈显著负相关。由表6可知,不休耕处理中,奥甲螨科和卷甲螨科则分别与土壤pH呈显著负相关和显著正相关($P<0.05$),邦甲螨科与土壤有机质含量呈显著负相关($P<0.05$),肉食螨科和棘跳科与土壤铵态氮含量呈显著正相关($P<0.01$);休耕处理中,隐颚螨科、罗甲螨科和卷甲螨科与土壤铵态氮含量呈显著负

表4 土壤温湿度及种植模式对土壤微节肢动物摄食活性的交互作用(F值)

Table 4 Interaction of soil temperature and humidity and planting patterns on the feeding activity of soil microarthropods (F-value)

	土壤温湿度 Soil temperature and humidity	种植模式 Planting pattern	土壤温湿度×种植模式 Soil temperature and humidity×Planting pattern
土壤微节肢动物摄食活性 Soil microarthropod feeding activity	5.823*	8.377*	2.326

注:*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。
Note: * indicate significant correlation at $P<0.05$ levels.

表5 土壤理化因子与土壤微节肢动物群落参数的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between soil physicochemical properties and soil microarthropod community parameters

处理 Treatment	土壤理化因子 Soil physicochemical property	多样性指数 Shannon-Weiner index	均匀性指数 Pielou index	丰富度 指数 Margalef index	摄食活性 Feeding activity
不休耕 Non-fallow	pH	0.781*	0.744*	0.785*	0.404
	SOM	0.576	0.369	0.504	0.486
	AP	-0.062	0.224	-0.190	0.452
	NH ₄ ⁺ -N	0.238	-0.114	0.374	-0.339
	NO ₃ ⁻ -N	0.586	0.335	0.594	0.438
休耕 Fallow	SM	-0.451	-0.558	-0.378	-0.874**
	pH	0.297	-0.075	0.435	-0.223
	SOM	0.234	0.061	0.217	0.372
	AP	-0.327	0.101	-0.412	-0.084
	NH ₄ ⁺ -N	-0.191	0.369	-0.024	0.546
	NO ₃ ⁻ -N	0.103	0.250	0.029	0.463
	SM	0.388	-0.719*	0.389	-0.816*

表6 土壤微节肢动物类群与土壤理化因子的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between soil microarthropods and soil properties

处理 Treatment	类群 Group	pH	SOM	AP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	SM
不休耕 Non-fallow	肉食螨科 Cheyletidae	0.334	-0.046	-0.516	0.870**	0.444	-0.020
	奥甲螨科 Oppiidae	-0.812*	-0.383	-0.001	-0.146	-0.403	0.385
	邦甲螨科 Banksinoma	-0.154	-0.764*	-0.189	-0.023	-0.611	0.304
	卷甲螨科 Phthiracarus	0.756*	0.190	-0.034	0.240	0.406	-0.674
	棘跳科 Onychiurus	0.011	-0.133	-0.527	0.849**	-0.378	0.227
休耕 Fallow	隐颚螨科 Cryptognathus	-0.395	-0.604	0.442	-0.840**	-0.610	0.619
	罗甲螨科 Lohmaniidae	0.193	0.215	0.167	-0.793*	-0.462	0.238
	奥甲螨科 Oppiidae	0.056	-0.182	0.042	-0.051	-0.512	0.714*
	卷甲螨科 Phthiracarus	0.325	0.205	0.549	-0.753*	-0.560	0.382

相关,奥甲螨科与土壤含水量呈显著正相关($P<0.05$)。

2.6 休耕条件下土壤微节肢动物群落结构与土壤理化因子的冗余分析

各处理中土壤微节肢动物与理化因子的冗余分析结果(图4)显示,不休耕样地第1、2排序轴分别贡献了23.0%和20.3%的解释率。沿轴1方向看,驱动不休耕处理中土壤微节肢动物群落结构发生变化的主要因子为土壤pH($P<0.05$)。休耕样地第1、2排序轴的解释率分别为27.7%和21.6%,沿轴2方向看,休耕处理中驱动土壤微节肢动物群落结构发生变化的主要因子为土壤铵态氮($P<0.05$)。

3 讨论

本研究中,休耕处理的土壤微节肢动物丰度较不休耕处理降低了58%,这与LI等^[35]将林下植被连同根系去除后发现土壤节肢动物的丰度和多样性显著降低的结果一致,吴廷娟等^[36]的研究也发现植物根系的去除会显著降低土壤节肢动物种群数量。这说明根系的代谢作用会增加土壤中的碳输入,根系分泌物的调节会使更多的有机物质进入土壤,进而增加土壤微生物的活性^[37],导致以其为食源的土壤微节肢动物丰度的增加。而休耕会减少根系生物量,进而影响根际微生物种群,进一步抑制土壤微节肢动物的丰度^[38]。还有研究发现有无植被不仅会通过影响根系进而影

响土壤动物群落组成,而且会通过改变土壤小气候来影响土壤生物群的活动^[39],而土壤微节肢动物对土壤小气候的变化非常敏感^[9,35,40]。本研究中休耕处理由于缺少了作物的庇护作用,导致表层土壤水分更易蒸发^[41],使得0~5 cm深度的土壤平均湿度相较于5~10 cm下降了8.3%,同时土壤微节肢动物丰度减少了54%。另外,本研究还发现在有植物的不休耕处理中土壤微节肢动物有明显的表聚效应。不休耕处理0~5 cm土层的微节肢动物丰度相较于5~10 cm土层增长了38.4%,一方面可能是由于小麦根系生物量在0~5 cm土层占比更大^[42],能够为土壤微节肢动物提供更多的食物资源,另一方面可能是由于植物的庇护作用减少了地表的太阳辐射强度,使得较浅土层具有较适宜的土壤温湿度,更适合土壤微节肢动物的生存和繁衍^[43]。

对土壤微节肢动物摄食活性的研究发现,不休耕处理中从拔节期到成熟期的土壤微节肢动物摄食活性依次为18.0%、10.8%和7.0%,呈逐渐下降的趋势。这表明随着小麦生长期的推移,作物凋落物和根系分泌物等有机物质输入土壤中的量也逐渐增多,导致饵料的消耗率下降。与微节肢动物丰度的变化趋势相反,摄食活性在动物丰度更低的休耕处理中反而更高,显著高于不休耕处理($P<0.05$)。这表明来自作物根系分泌的有机物质相较于人工制作的饵料更能吸引微节肢动物取食^[9]。此外有研究表明,土壤温度和

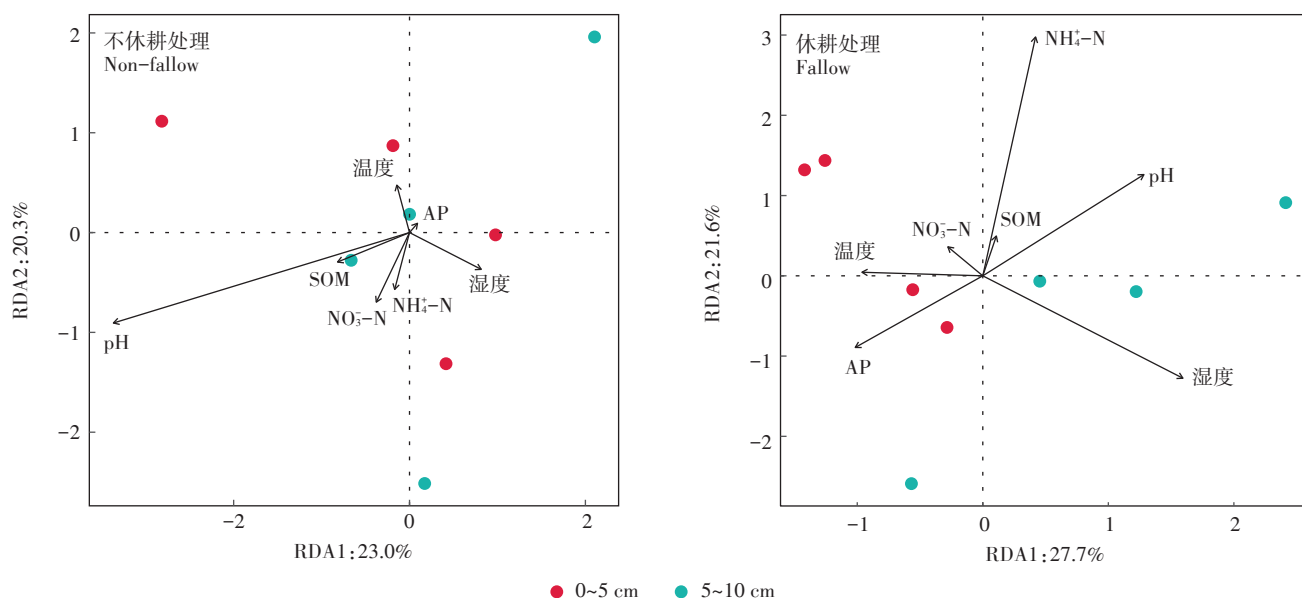


图4 不休耕和休耕处理下土壤微节肢动物群落结构与理化因子的冗余分析

Figure 4 Redundancy analysis of soil microarthropod community structure and soil properties in non-fallow and fallow treatments

湿度通常能够对诱饵薄条试验的结果起到决定性作用^[10,26,44]。Crowther等^[45]的研究表明许多土壤动物的性状对土壤相对湿度较为敏感,土壤动物的摄食活性易受到土壤湿度变化的影响,Tao等^[46]对温带森林的调查结果也证明了这个现象。本研究结果与其一致,休耕处理中土壤微节肢动物的摄食活性在土壤平均湿度最高(23.6%)的抽穗期最为活跃,达到39.3%。

本研究表明土壤有效磷和硝态氮含量在休耕处理中显著高于不休耕处理。这与覃娟^[47]的研究结果一致,表明不休耕处理中的作物根系会吸收土壤中的速效养分^[48],高琳等^[49]也发现休耕有利于土壤养分的恢复与提升。同时,有研究发现土壤微节肢动物对土壤速效养分的响应较为强烈^[50],其中土壤螨类受铵态氮的影响较大^[51],且高氮量不利于螨类的生存和发展^[31]。本研究也发现了类似的现象,不休耕处理中肉食螨科与土壤铵态氮呈极显著正相关($P<0.01$),而休耕处理中的铵态氮含量与隐颚螨科、罗甲螨科和卷甲螨科均呈显著负相关,表明土壤铵态氮含量过高可能会导致土壤螨类丰度下降。此外,YIN等^[52]的研究发现相比于弹尾目,螨类对土壤养分变化更敏感,本研究也发现受土壤养分影响最大的是螨类,而非跳虫。

4 结论

休耕使土壤微节肢动物丰度降低了58%,但土壤微节肢动物的平均摄食活性却增长了近3倍。此外,休耕降低了表层土壤湿度,同时使土壤微节肢动物丰度相较于5~10 cm土层减少了54%,土壤湿度是影响土壤微节肢动物群落组成及其摄食活性的主要驱动因子。

参考文献:

- [1] 贾丽娟,焦为杰,王先明,等.基于遥感监测河北省地下水超采区冬小麦休耕效果研究[J].现代农业科技,2022(3):196-200. JIA L J, JIAO W J, WANG X M, et al. Effect of winter wheat fallow in groundwater overexploitation area of Hebei Province based on remote sensing monitoring[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022(3): 196-200.
- [2] 《华北地区地下水超采治理行动方案》由水利部等四部委联合印发[J].水利规划与设计,2019(3):151. *Action Plan for Groundwater Overexploitation Control in North China* jointly issued by the Ministry of Water Resources and other four ministries and commissions[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(3):151.
- [3] 丛鑫,张立志,徐征,等.水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J].农业机械学报,2021,52(3):315-324. CONG X, ZHANG L Z, XU Z, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction

- on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3):315-324.
- [4] 金涛.中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J].自然资源学报,2019,34(1):14-25. JIN T. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1):14-25.
- [5] 位铁强.以铁的作风打造一支新时代水利改革发展“铁军”[J].河北水利,2020(12):4-9. WEI T Q. Create an "iron army" of water conservancy reform and development in the new era with iron style[J]. *Hebei Water Resources*, 2020(12):4-9.
- [6] 李媛媛,廖家辉,许子乾,等.有机肥和植被去除管理对人工林土壤节肢动物多样性的影响[J].生态学报,2021,41(7):2761-2769. LI Y Y, LIAO J H, XU Z Q, et al. Effects of organic fertilizer application and understory plant removal on the diversity of soil arthropods in poplar plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7):2761-2769.
- [7] 张卫信,申智锋,邵元虎,等.土壤生物与可持续农业研究进展[J].生态学报,2020,40(10):3183-3206. ZHANG W X, SHEN Z F, SHAO Y H, et al. Soil biota and sustainable agriculture: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10):3183-3206.
- [8] BIRKHOFFER K, DIEKOTTER T, BOCH S, et al. Soil fauna feeding activity in temperate grassland soils increases with legume and grass species richness[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10):2200-2207.
- [9] FUJII S, SAITOH S, TAKEDA H. Effects of rhizospheres on the community composition of Collembola in a temperate forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 83:109-115.
- [10] LINDO Z. Warming favours small-bodied organisms through enhanced reproduction and compositional shifts in belowground systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 91:271-278.
- [11] 卢萍,徐演鹏,谭飞,等.黑土区农田土壤节肢动物群落与土壤理化性质的关系[J].中国农业科学,2013,46(9):1848-1856. LU P, XU Y P, TAN F, et al. Relationship between cropland soil arthropods community and soil properties in black soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(9):1848-1856.
- [12] RIUTTA T, CLACK H, CROCKATT M, et al. Landscape-scale implications of the edge effect on soil fauna activity in a temperate forest[J]. *Ecosystems*, 2016, 19(3):534-544.
- [13] KARDOL P, REYNOLDS W N, NORBY R J, et al. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1):37-44.
- [14] ROŻEN A, SOBCZYK Ł, LISZKA K, et al. Soil faunal activity as measured by the bait-lamina test in monocultures of 14 tree species in the Siemianice common-garden experiment, Poland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3):160-167.
- [15] 樊云龙,陈许,苏孝良,等.退化生态系统土壤动物研究概况[J].中国生态农业学报,2010,18(3):668-673. FAN Y L, CHEN H, SU X L, et al. Review of the research on soil animals in degraded ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):668-673.
- [16] 范凯凯,李淑贞,陈金强,等.呼伦贝尔草原土壤呼吸作用空间异质性分析[J].草地学报,2022,30(1):205-211. FAN K K, LI S Z,

- CHEN J Q, et al. Spatial heterogeneity analysis of soil respiration in Hulunbuir grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 205–211.
- [17] XIONG Y M, XIA H X, LI Z A, et al. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China[J]. *Plant and Soil*, 2008, 304(1/2): 179–188.
- [18] ZHU Y, WANG Y F, CHEN L D. Effects of non-native tree plantations on soil microarthropods and their feeding activity on the Chinese Loess Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 477: 118501.
- [19] TAN B, YIN R, YANG W, et al. Soil fauna show different degradation patterns of lignin and cellulose along an elevational gradient[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103673.
- [20] HAMEL C, SCHELLENBERG M P, HANSON K, et al. Evaluation of the “bait-lamina test” to assess soil microfauna feeding activity in mixed grassland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(2/3): 199–204.
- [21] JÄNSCH S, SCHEFFCZYK A, RÖMBKE J. The bait-lamina earthworm test: A possible addition to the chronic earthworm toxicity test? [J]. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2017, 2(1): 1–11.
- [22] FIRBANK L G, BERTORA C, BLANKMAN D, et al. Towards the co-ordination of terrestrial ecosystem protocols across European research infrastructures[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(11): 3967–3975.
- [23] KLIMEK B, NIKLIŃSKA M, JAŻWA M, et al. Application of the bait-lamina method to measure the feeding activity of soil fauna in temperate forests[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2015, 63(3): 414–423.
- [24] WALL D H, BRADFORD M A, ST JOHN M G, et al. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2661–2677.
- [25] SIMPSON J E, SLADE E, RIUTTA T, et al. Factors affecting soil fauna feeding activity in a fragmented lowland temperate deciduous woodland[J]. *PLoS One*, 2012, 7(1): e29616.
- [26] XU X, SUN Y, SUN J, et al. Cellulose dominantly affects soil fauna in the decomposition of forest litter: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2020, 378: 114620.
- [27] CARRERA N, BARREAL M E, GALLEGO P P, et al. Soil invertebrates control peatland C fluxes in response to warming[J]. *Functional Ecology*, 2009, 23(3): 637–648.
- [28] 谢致敬, 常亮, SCHEU S, 等. 长白山森林生态系统凋落物层和土壤层跳虫物种多样性和功能多样性对海拔梯度的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(9): 3471–3481. XIE Z J, CHANG L, SCHEU S, et al. Taxonomic and functional diversity of Collembola in litter and soil along an altitudinal gradient at Changbai Mountain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3471–3481.
- [29] 吴宪, 张婷, 孔云, 等. 配施有机物料对华北小麦-玉米轮作体系土壤节肢动物的影响[J]. *生态学报*, 2019, 38(12): 3689–3696. WU X, ZHANG T, KONG Y, et al. Effects of organic material application on soil arthropods in wheat-maize rotation system in north China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3689–3696.
- [30] 朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 911–920. ZHU X Y, ZHU B. Effects of different fertilization regimes on the main groups of soil fauna in cropland of purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(5): 911–920.
- [31] 杜亚彬, 马源淇, 王雪峰, 等. 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[J]. *植物保护学报*, 2020, 47(6): 1251–1260. DU Y B, MA Y Q, WANG X F, et al. Effects of rhizosphere effects of Siberian ginseng *Acanthopanax senticosus* and soil environmental factors on Collembola community composition in soil[J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47(6): 1251–1260.
- [32] 冯鹏艳, 梁利宝, 许剑敏. 不同施肥处理对采煤塌陷区复垦土壤理化性质和油菜产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(8): 1375–1379. FENG P Y, LIANG L B, XU J M. Effects of different fertilization treatments on physical and chemical properties of coal mining subsidence reclaimed soil and rape yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(8): 1375–1379.
- [33] GONGALSKY K B, PERSSON T, POKAEZHEVSKII A D. Effects of soil temperature and humidity on the feeding activity of soil animals as determined by the bait-lamina test[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(1): 84–90.
- [34] REINECKE A J, HELLING B, LOUW K, et al. The impact of different herbicides and cover crops on soil biological activity in vineyards in the Western Cape, South Africa[J]. *Pedobiologia*, 2002, 46(5): 475–484.
- [35] LI Y, CHEN Y, XU C, et al. The abundance and community structure of soil arthropods in reclaimed coastal saline soil of managed poplar plantations[J]. *Geoderma*, 2018, 327: 130–137.
- [36] 吴廷娟, 谢小龙, 董诚明. 地黄对土壤动物数量和群落结构的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(11): 2273–2278. WU T J, XIE X L, DONG C M. Effects of *Rehmannia glutinosa* on the number of soil animals and community structure[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(11): 2273–2278.
- [37] LANGE M, EISENHAEUER N, SIERRA C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6707.
- [38] 贺同鑫, 李艳鹏, 张方月, 等. 林下植被剔除对杉木林土壤呼吸和微生物群落结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(8): 797–806. HE T X, LI Y P, ZHANG F Y, et al. Effects of understory removal on soil respiration and microbial community composition structure in a Chinese fir plantation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(8): 797–806.
- [39] YIN R, GRUSS I, EISENHAEUER N, et al. Land use modulates the effects of climate change on density but not community composition of Collembola[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 138: 107598.
- [40] RODRIGUEZ E, FERNANDEZ-ANERO F J, RUIZ P, et al. Soil arthropod abundance under conventional and no tillage in a Mediterranean climate[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 85(1/2): 229–233.
- [41] 刘剑荣, 杨磊, 卫伟, 等. 半干旱黄土区柠条灌丛不同植被管理方式下的土壤水分[J]. *草业科学*, 2021, 38(8): 1439–1450. LIU J R, YANG L, WEI W, et al. Soil moisture in different vegetation management methods of *Caragana korshinskii* shrub in the semi-arid

- loess area[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(8):1439–1450.
- [42] 梁海. 分层施肥对小麦、玉米生长及养分迁移的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2019:53. LIANG H. Effects of layered fertilization on wheat, maize growth and nutrient migration[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019:53.
- [43] LAKSHMI G, BEGGI F, MENTA C, et al. Dynamics of soil microarthropod populations affected by a combination of extreme climatic events in tropical home gardens of Kerala, India[J]. *Pedobiologia*, 2021, 85/86:150719.
- [44] VOROBICHNIK E L, BERGMAN I E. Bait-lamina test in the assessment of polluted soils: Choice of exposure duration[J]. *Russian Journal of Ecology*, 2020, 51(5):430–439.
- [45] CROWTHER T W, THOMAS S M, MAYNARD D S, et al. Biotic interactions mediate soil microbial feedbacks to climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(22):7033–7038.
- [46] TAO H, SLADE E M, WILLIS K J, et al. Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 218:133–140.
- [47] 覃娟. 农艺措施对菜田土壤碳汇形成的影响[D]. 上海:上海交通大学, 2010:91. QIN J. Effects of formation of carbon sequestration under vegetable fields on agricultural measures[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010:91.
- [48] 盘礼东, 李瑞. 有机覆盖措施对土壤肥力的影响研究现状及展望[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(6):91–101. PAN L D, LI R. Research status and prospect of effects of organic mulching on soil fertility[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2021, 39(6):91–101.
- [49] 高琳, 卢文婷, 林昌华, 等. 粤北香芋种植区典型土壤剖面发育特征[J]. 中国农学通报, 2022, 38(10):85–91. GAO L, LU W T, LIN C H, et al. Development characteristics of typical soil profile of fragrant taro region in northern Guangdong[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(10):85–91.
- [50] 辛未冬, 刘华煜, 杨铁萌, 等. 复垦对煤矸石山地表节肢动物群落特征的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(7):2213–2222. XIN W D, LIU H Y, YANG Y M, et al. Effect of reclamation on the characteristics of surface arthropod community in coal gangue[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(7):2213–2222.
- [51] 哈斯塔米尔. 内蒙古典型草原大针茅(*Stipa grandis*)凋落物分解过程中土壤动物群落的变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2013. HASITAMIER. Changes of soil fauna community during the decomposition of *Stipa grandis* litter in Inner Mongolia typical steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2013.
- [52] YIN R, EISENHAUER N, SCHMIDT A, et al. Climate change does not alter land-use effects on soil fauna communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 140:1–10.

(责任编辑:朱晓昱)