



生态学杂志
Chinese Journal of Ecology
ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目: 东北黑土区典型农田培育措施对土壤动物分布的影响
作者: 王芝云, 牛之欣, 白杨, 许振欣, 余恩萍, 杜晓芳
收稿日期: 2024-12-15
网络首发日期: 2025-07-10
引用格式: 王芝云, 牛之欣, 白杨, 许振欣, 余恩萍, 杜晓芳. 东北黑土区典型农田培育措施对土壤动物分布的影响[J/OL]. 生态学杂志.
<https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250709.1659.008>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

东北黑土区典型农田培育措施对土壤动物分布的影响

王芝云^{1,2} 牛之欣^{1*} 白杨² 许振欣² 余恩萍² 杜晓芳^{2*}

(¹ 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳大学环境学院, 沈阳 110044;

² 中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与保育重点实验室(中国科学院), 沈阳 110016)

摘要 土壤动物是土壤中重要的指示生物, 对生态系统结构和功能具有重要的影响。研究东北黑土区典型农田培育措施对土壤动物分布及多样性的影响, 对东北黑土农田生态系统的可持续利用至关重要。本研究收集整理 1992—2024 年中国东北黑土区公开发表的文献, 利用 meta 分析方法, 以常规措施为对照, 分析农田培育措施(保护性耕作与有机物料添加)对土壤动物的影响, 利用反距离插值法绘制黑土区土壤动物的空间分布图。结果表明: (1) 与常规措施相比, 黑土培育措施对大、中小型土壤动物的密度和多样性指数均有积极影响, 大型土壤动物密度、多样性指数分别增加 54% 和 21%, 中小型土壤动物密度、多样性指数分别增加 56% 和 17%。(2) 蚯蚓在黑土区呈东部多西部少的分布特征, 螨类和跳虫呈西北多东南少的分布特征, 线虫在黑土区呈现出由南向北逐渐增加的分布特征。(3) 黑土培育措施下, 土壤动物的分布受经纬度、土壤 pH 和含水量的影响, 其中蚯蚓、螨类、跳虫密度随着经度升高逐渐降低, 螨类和跳虫密度随着纬度的升高逐渐增加。总之, 农田培育措施是黑土区土壤动物的分布及多样性变化的重要影响因素, 保护性耕作、有机物料添加等黑土培育措施能够改善土壤动物群落结构, 为土壤动物提供适宜的生存环境, 提升农田土壤健康和生物多样性。

关键词 东北地区; 农田培育措施; 土壤动物; 黑土; meta-分析

Effects of typical farmland cultivation measures on soil fauna distribution in Northeast black soil region, China. WANG Zhiyun^{1,2}, NIU Zhixin^{1*}, BAI Yang², XU Zhenxin², YU Enping², DU Xiaofang^{2*} (¹Key Laboratory of Ecological Restoration of Regional Polluted Environment, Ministry of Education, School of Environment, Shenyang University, Shenyang 110044, China; ²CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Silviculture, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China).

Abstract: Soil fauna is the most important indicator of organisms in the soil and has an importance in influencing the structure and function of the soil ecosystem. It is essential to investigate how typical farmland cultivation practices affect the distribution and diversity of soil fauna in the black soil area for the sustainable utilization of the black soil farmland ecosystem in Northeast China. In this study, we collated the published literature in the black soil region of Northeast China from 1992 to 2024. The effects of farmland cultivation practices (conservation tillage and organic material addition) on the black soil region's fauna were compared with conventional measures using the meta-analysis method. Finally, we used the inverse distance interpolation method to create a map of the black soil region's soil fauna's spatial distribution. The results showed that (1) black soil cultivation practices had a positive effect on the density and variety index of macro- and microfauna as compared to conventional methods. Macrofauna showed a substantial rise in density and diversity index of 54% and 21%, respectively, whereas micro- and mesofauna showed increases in density and diversity index of 56% and 17%,

国家重点研发计划项目(2024YFD1501301, 2023YFD1500701)、辽宁省自然科学基金联合基金项目(2023-BSBA-325)和辽宁省优秀青年基金(2024JH3/10200026)资助。

收稿日期: 2024-12-15

接受日期: 2025-07-07

*通信作者 E-mail: dxsf@iae.ac.cn, jesonniu@126.com

respectively. (2) In the area with black soil, the distribution of earthworms was more common in the east and less common in the west, mites and collembola were more common in the northwest and less common in the southeast, and nematodes were progressively moving from the south to the north. (3) The distribution of soil fauna was influenced by soil pH, soil moisture, and longitude and latitude under the black soil cultivation method. The density of earthworms, mites and collembola gradually decreased with the increase of longitude, and the density of mites and collembola gradually increased with the increase of latitude. In conclusion, the distribution and diversity of soil fauna in black soil areas are significantly impacted by farmland production practices. Conservation tillage, organic material addition, and other black soil cultivation measures can improve the community structure of soil fauna and provide a suitable living environment for soil fauna to enhance soil health and biodiversity in farmlands.

Keywords: Northeast China; farmland cultivation measure; soil fauna; black soil; meta-analysis

黑土是地球上珍贵的土壤资源。黑土地拥有黑色或暗黑色腐殖质表土层,具有土壤性状好、自然肥力高、供肥能力强、质地疏松、适宜植物生长等特点(盛明等, 2025)。东北黑土作为世界四大黑土带之一(Qu *et al.*, 2021),是不可再生的战略性资源,是我国重要的粮食生产基地之一,在保障我国粮食安全方面起着至关重要的作用(刘萍等, 2022)。近年来,过度开垦、土壤侵蚀及不合理的田间管理措施,造成一系列生态环境问题,特别是东北黑土区因长期的高强度利用和不合理的农业耕作而引起的黑土退化问题已受到各界的普遍关注(Xu *et al.*, 2024)。为了合理利用和保护黑土地,科学家们通过采取保护性耕作、有机物料添加等黑土培育措施维持黑土资源的可持续利用。保护性耕作是以少(免)耕播种和农作物秸秆覆盖还田为主要措施的现代耕作技术,可有效改善土壤环境,维持和提高土壤生物多样性(蒋云峰等, 2023)。有机物料添加是通过向土壤中加入有机物料,如秸秆、粪肥和生物炭等,提升土壤养分、驱动有机质良性循环、增加土壤生物数量,最终改善土壤质量(Shahid *et al.*, 2017)。

土壤动物是农田生态系统的重要组成部分,能够通过加快生物残体分解、促进土壤有机质形成,影响土壤养分循环和能量流动,进而在改善农田土壤环境、维持农田土壤健康和可持续利用中发挥积极作用(Beaumelle *et al.*, 2021)。土壤动物多样性以及空间分布通常会受到常规耕作、保护性耕作等农田管理措施的影响。蒋云峰等(2017)研究表明,耕作方式的改变,影响黑土区大型土壤动物群落组成和结构,如随着免耕秸秆覆盖频率的增加,土壤结构、养分含量等的改善,可支持更多种类和数量的土壤动物居住与繁殖。杨旭等(2017)研究发现,微生物催腐剂与秸秆配比还田能够提高土壤微生物活性,促进土壤养分循环,有利于黑土中的甲螨生存。美丽等(2018)在研究有机肥对农田土壤动物的影响中发现,有机肥经土壤动物的分解,营养物质稳定释放,有机质丰富,增加了农田中螨类的密度。施肥不仅会在一定程度上改变土壤动物群落组成,而且会影响土壤动物的群落多样性与分布特征(罗熲丽等, 2019)。农田管理措施在一定程度上对蚯蚓的空间分布发挥着重要的作用,土壤的pH值、含水量及碳含量的变化,影响蚯蚓的密度分布(Li *et al.*, 2023)。因此,保护性耕作和有机物料添加作为重要的黑土培育措施为农田土壤动物提供了稳定的生存空间和丰富的物质资源,能够提高土壤动物数量,改变群落结构和组成,影响土壤动物的分布。但黑土培育措施是否对不同土壤动物的多样性、密度等均有积极的影响?不同土壤动物在东北黑土区呈现怎样的分布特征,受哪些因素影响?这些问题都有待进一步解答。

基于此,本研究在中国知网和 Web of Science 搜索东北黑土区土壤动物的相关文献,对搜索的文献进行归类整合,通过与常规农田管理措施进行对比,探讨黑土培育措施对土壤动物多样性、均匀度指数、优势度指数等的影响,分析黑土培育措施(保护性耕作和有机物料添加)下不同类型土壤动物的分布特征,并探索东北黑土区土壤动物数量变化的影响因素。研究结果为我们进一步评价东北黑土培育措施对土壤动物的影响提供了科学依据,对东北黑

土农田生态系统稳定性及可持续性至关重要。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本文以东北黑土区农田土壤动物为研究对象，在中国知网和 Web of Science 文献数据库中检索相关文献，中文检索词包括“黑土”、“土壤动物”、“土壤线虫”、“跳虫”、“螨”、“节肢动物”、“原生动”和“蚯蚓”，英文检索词包括“black soil”、“mollisols”、“chernozems”、“soil animal”、“soil fauna”、“soil organism”、“collembola”、“arthropod”、“springtail”、“mites”、“oribatid”、“earthworm”、“nematode”、“protozoa”and“China”，搜索的文献涵盖了 1992—2024 年的相关研究。其中通过 Web of Science 检索了 217 篇文献，中国知网检索了 66 篇文献。对搜索的文献建立如下筛选标准：（1）采样点均位于中国东北黑土区（2）试验种植作物为玉米（3）试验处理重复数 ≥ 3 ，且试验必须包括对照组和处理组，对照组农田管理措施为常规措施，处理组为黑土培育措施：包括保护性耕作和有机物料添加（保护性耕作以常规耕作处理为对照，有机物料添加以不施肥或空白处理为对照）。通过以上标准的筛选得到符合标准的文献 28 篇。提取 28 篇文献中采样点的土壤动物、经纬度、土壤 pH、含水量等信息。建立一个包含土壤动物的类群数、密度、多样性、丰富度、均匀度和优势度指数的数据库，共得到 meta 分析有效数据 1094 组。该数据库的研究地点分布情况如图所示（图 1）。

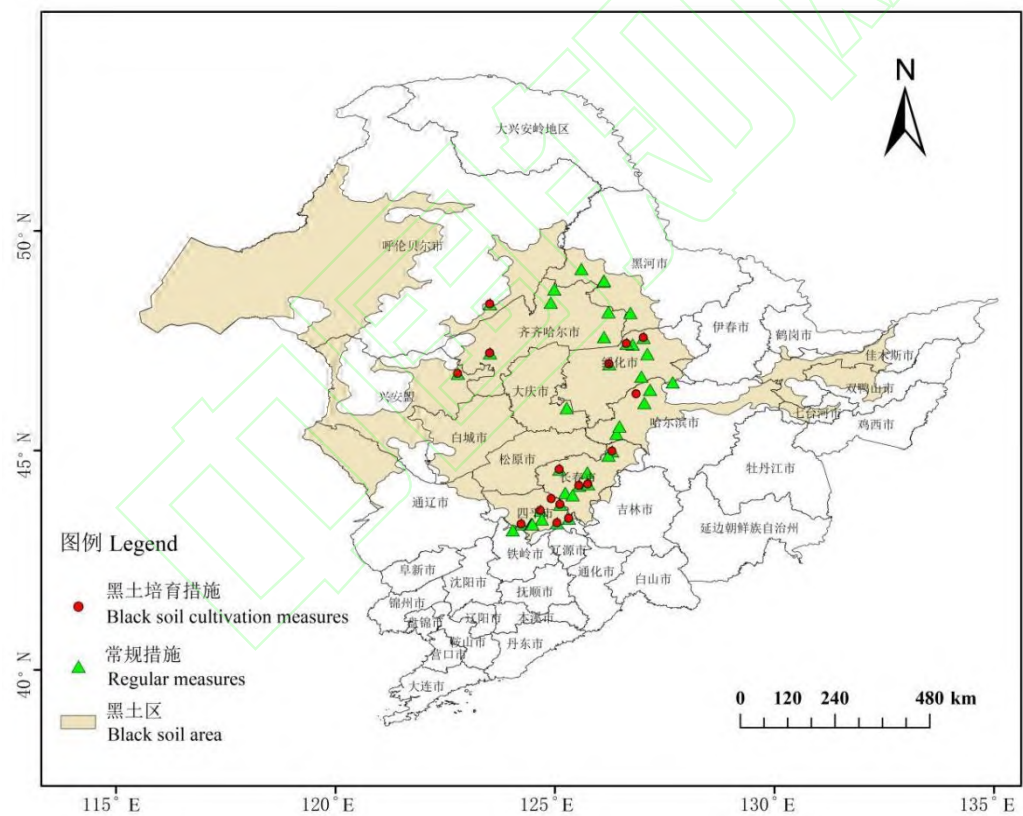


图 1 28 篇文献的研究地点分布图（审图号 GS(2019)1822 号）

Fig. 1 Map of study sites for 28 articles (GS(2019)1822)

1.2 数据分析

本文运用 Excel 进行数据分类、汇总。利用 ArcGIS 10.8 软件地统计模块中的反距离插值法 (IDW) 绘制东北黑土区土壤动物数量空间分布图。地图中黑土区范围依据第二次全国土壤普查 1:100 万土壤图 (1979 年) 数据，以黑土、黑钙土、栗钙土和草甸土作为黑土区的标志土壤，将其集中分布区划分为黑土区 (刘宝元等, 2021; 汪景宽等, 2021)。利用反距离插值法分别选取东北黑土区大型土壤动物蚯蚓、中型土壤动物螨类和跳虫的密度、小型土壤

动物线虫的相对多度进行空间插值处理，得到空间分布图。其中，蚯蚓、螨类和跳虫的密度单位为只 m^{-2} 。

反距离权重法 (IDW) 是将某一未知点周围的已知点进行加权平均计算，每个已知点与未知点的距离决定了其对已知点属性值的权重，距离越近，权重越大，计算公式如下：

$$Z_x = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-2}} Z_{x_i}$$

式中， Z_x 为插值点 x 的插值结果； n 为采样点数量； Z_{x_i} 为第 i 个采样点的土壤动物实际数量； d_i 为插值点 x 与已知采样点 x_i 之间的距离。

本研究提取了黑土培育措施和常规措施中土壤动物数据的标准差 (SD) 和样本量 (n)。如果文献中提供了标准误的数据，则可通过公式计算标准差：

$$SD = SE \sqrt{N}$$

式中， SD 为标准差； SE 为标准误； N 为样本量。

以自然对数响应比为效应值来计算黑土培育措施对土壤动物的影响，计算公式如下：

$$\ln RR = \ln \left(\frac{\bar{x}_t}{\bar{x}_c} \right)$$

式中， $\ln RR$ 为对数响应比； $\bar{x}_t$ 和 $\bar{x}_c$ 为处理和对照的响应变量均值。

自然对数响应比的方差 (v) 计算公式如下：

$$v = \frac{S_t^2}{n_t \bar{x}_t^2} + \frac{S_c^2}{n_c \bar{x}_c^2}$$

式中， S_t 和 S_c 为处理和对照的标准差； n_t 和 n_c 为处理和对照的样本量。

本研究采用随机效应模型进行 meta 分析，数据分析和作图在 R 4.3.3 软件中利用 “metafor”、“ggplot2”、“glmulti” 程序包 (Viechtbauer, 2010) 进行，使用函数 `lm()` 建立回归分析模型，以分析土壤动物密度随经纬度和环境因子的变化情况。选择混合效应模型，利用 `rma.mv` 和限制性最大似然法 (REML) 估计了黑土培育措施对土壤动物的影响。使用 Egger 的回归检验、漏斗图和失安全系数来检验每个变量的潜在发表偏倚 (Egger *et al.*, 1997; Macaskill *et al.*, 2001)。失安全系数 $N (=25148) > 5n+10$ ，说明本研究的结论可靠，发表偏倚对结果影响不大。Egger 检验的显著性水平 $P > 0.05$ ($z=1.74$, $P=0.08$)，表示漏斗图对称，结果受发表偏倚影响较小。

2 结果与分析

2.1 土壤动物对黑土培育措施的响应

以常规措施为对照，土壤动物对黑土培育措施响应的 meta 分析结果表明，整体上黑土培育措施对土壤动物的增加有积极影响，所有观测值的平均效应值显著大于零 ($P < 0.001$)。但土壤动物均匀度和密度对黑土培育措施的响应有所不同 (图 2)。其中，黑土培育措施有利于土壤动物密度的增加，增幅为 56%，而在黑土培育措施的影响下土壤动物均匀度指数降低，下降程度为 14%。

基于不同体型土壤动物对黑土培育措施的响应结果发现，大、中、小型土壤动物总效应值及其 95%CI 均大于 0，且中小型土壤动物效应值大于大型土壤动物，二者相差 2.56 倍 (表 1)。黑土培育措施对大、中、小型土壤动物密度和多样性指数均有显著积极影响。其中，在黑土培育措施影响下，大型土壤动物密度和多样性指数分别增加 54% 和 21%，中小型土壤动物的密度和多样性指数分别增加 56% 和 17%。并且，黑土培育措施可显著降低中小型土壤动物均匀度和大型土壤动物类群数，分别降低了 13% 和 6%，而丰富度和优势度指数未达到显著水平，黑土培育措施对其影响较小。

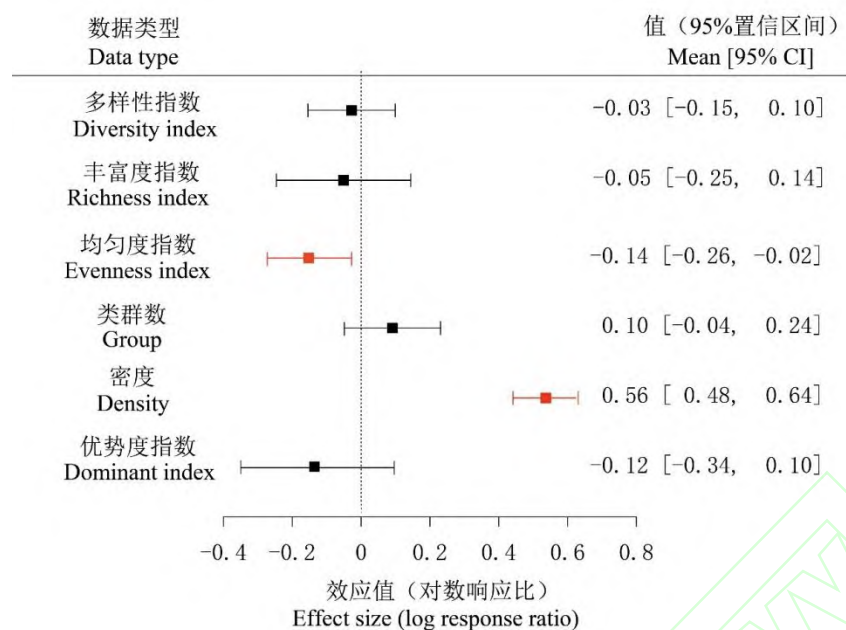


图 2 土壤动物多样性、丰富度、均匀度、类群数、密度、优势度对黑土培育措施的响应
Fig. 2 Response of soil fauna diversity, richness, evenness, group, density, and dominance to black soil cultivation measures
 注：红色表示积极的显著影响。
 Note: Red color indicates a positive and significant effect.

表 1 不同土壤动物类群数、密度、多样性、丰富度、均匀度和优势度对黑土培育措施的响应
Table 1 Response of groups, density, diversity, richness, evenness and dominance of soil fauna to cultivation measures in black soil

数据类型 Data type	中小型土壤动物 Meso/micro-fauna			大型土壤动物 Macro-fauna		
	效应值 Effect size	95% 置信区间 95% CI	P	效应值 Effect size	95%置信区间 95% CI	P
类群数 Group	0.18	0.08~0.29	0.1	-0.06	-0.12~0.01	<0.01
密度 Density	0.56	0.35~0.76	<0.001	0.54	0.43~0.65	<0.001
多样性指数 Diversity index	0.17	0.07~0.26	<0.001	0.21	0.15~0.28	<0.001
丰富度指数 Richness index	0.02	-0.37~0.4	0.59	-0.07	-0.34~0.1	0.92
均匀度指数 Evenness index	-0.13	-0.31~0.04	<0.05	-0.15	-0.29~-0.00	0.14
优势度指数 Dominant index	-0.02	-0.37~0.34	0.19	-0.18	-0.45~0.09	0.93
合计 Total	0.23	0.15~0.30	<0.001	0.09	0.04~0.14	<0.001

2.2 东北黑土区土壤动物空间分布特征

基于反距离插值法，大型土壤动物以蚯蚓为代表，中型土壤动物以螨类和跳虫为代表，小型土壤动物以线虫为代表，进一步绘制了不同类型土壤动物的空间分布图。研究表明，常规农田管理措施和黑土培育措施下东北黑土区土壤动物空间分布的高低值过渡界线明显，呈现大块的条带状与斑块状（图 3）。黑土培育措施显著提高了蚯蚓、螨类和跳虫的密度，土壤动物分布数量在黑土培育措施下均大于常规措施。从整体来看，常规措施下蚯蚓在黑土区呈现出西北多东南少的分布特征，尤其是黑龙江省齐齐哈尔市数量最多；而在黑土培育措施下，蚯蚓分布数量最多的地区是内蒙古兴安盟东部，且有西北多，东南少的分布趋势（图 3a,b）。螨类和跳虫数量在常规措施下空间分布规律整体上相似，由西北向东南逐渐减少，

而在黑土培育措施下, 螨类和跳虫数量均在黑龙江省齐齐哈尔市出现高值分布(图 3c,d,e,f), 呈现出西北多, 东南少的分布特征。常规措施下的小型土壤动物线虫的相对多度在齐齐哈尔市最高, 呈现出由南向北逐渐增加的分布特征, 黑土培育措施下线虫多度分布趋势变化不大(图 3g,h)。

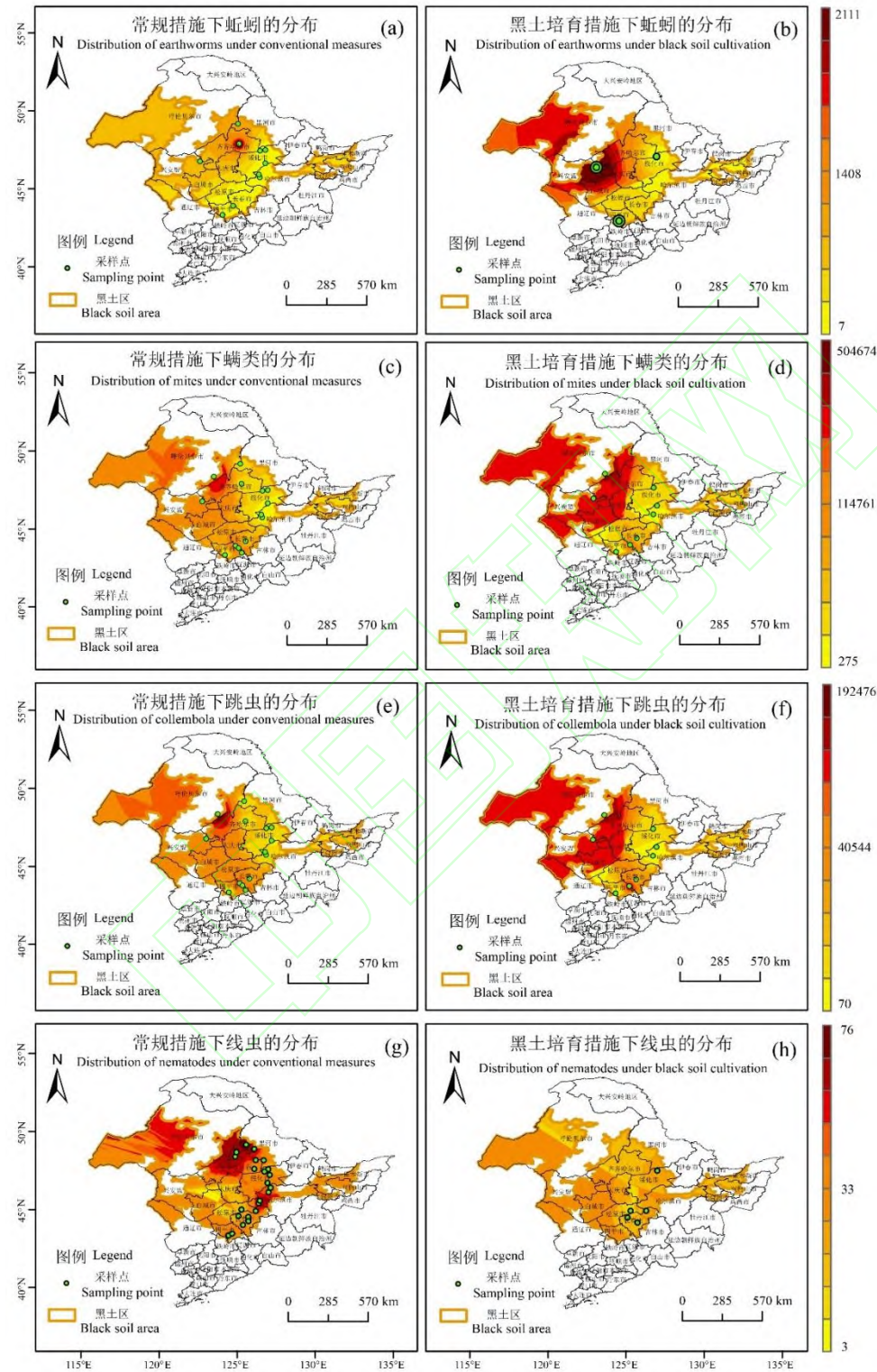


图3 东北黑土区土壤动物分布
Fig. 3 Distribution of soil fauna in Northeast China black soil area

2.3 黑土区土壤动物分布的影响因素

相关性分析结果表明, 常规措施下土壤 pH 值、含水量和有机碳与螨类密度不相关, 黑

土培育措施下土壤 pH 值与螨类密度显著正相关（表 2）；跳虫密度在常规措施下与土壤 pH 值显著正相关，黑土培育措施下与土壤 pH 值和含水量显著正相关；常规措施下土壤含水量与线虫相对多度显著负相关。

常规措施下，螨类和跳虫密度与经纬度均不相关；在黑土培育措施下，螨类和跳虫密度随经度的增加而显著降低，随纬度的增加而显著增加（表 3），常规措施下，蚯蚓密度与经纬度均不相关；黑土培育措施下，蚯蚓密度与经度显著负相关。

表 2 环境因子对土壤动物数量的影响

Table 2 Effects of environmental factors on the number of soil fauna individuals

土壤动物 Soil fauna	环境因子 Environmental factors	常规措施 Regular measures		黑土培育措施 Black soil cultivation measures	
		r	P	r	P
蚯蚓 Earthworm	pH	-	-	-0.09	0.66
	SOC	-	-	0.01	0.95
	SM	-	-	0.17	0.41
螨类 Mites	pH	0.10	0.42	0.18	<0.05
	SOC	-0.10	0.30	-0.04	0.51
	SM	-0.12	0.29	0.08	0.23
跳虫 Collembola	pH	0.44	<0.05	0.51	<0.001
	SOC	-0.06	0.70	-0.19	0.07
	SM	0.20	0.55	0.42	<0.05
线虫 Nematode	pH	0.05	0.288	-	-
	SOC	0.01	0.93	-	-
	SM	-0.20	<0.001	-	-

SOC: 有机碳; SM: 含水量。

SOC: Soil organic carbon; SM: Soil moisture.

表 3 经纬度对土壤动物数量的影响

Table 3 Effect of latitude and longitude on the number of soil fauna individuals

	土壤动物 Soil fauna	常规措施 Regular measures		黑土培育措施 Black soil cultivation measures	
		r	P	r	P
经度 Longitude	蚯蚓 Earthworm	-0.24	0.41	-0.49	<0.05
	螨类 Mites	-0.44	0.06	-0.59	<0.001
	跳虫 Collembola	-0.41	0.09	-0.52	<0.001
	线虫 Nematode	0.03	0.80	0.08	0.55
纬度 Latitude	蚯蚓 Earthworm	0.45	0.10	0.41	0.08
	螨类 Mites	0.15	0.54	0.51	<0.01
	跳虫 Collembola	0.11	0.65	0.42	<0.01
	线虫 Nematode	0.16	0.16	0.07	0.60

3 讨 论

3.1 农田管理措施对土壤动物多样性的影响

本研究通过 meta 分析，探究了东北黑土区土壤动物对农田培育措施的响应，结果发现，相比常规措施，土壤动物对黑土培育措施有积极的响应，黑土培育措施对大型土壤动物和中小型土壤动物的密度和多样性指数有显著影响，而对丰富度和优势度指数影响不显著。大、中、小土壤动物密度和多样性指数的变化是土壤动物自身生长规律和自然环境条件综合作用的结果（杨析, 2023），主要是因为多数中小型土壤动物生活在土壤上层 20 cm，使得这些群体特别容易受到耕作、施肥等农业管理措施的影响；一方面，土壤动物通过改变土壤孔隙和团聚体的数量与分布，为自身及其他生物创造了适宜的生境（傅声雷等, 2022）；比如，跳虫自身可以促进土壤微团聚体形成、提高土壤通气性或持水能力、加快有机物分解和养分

释放, 改变土壤功能 (Shen *et al.*, 2021)。另一方面, 部分土壤动物对扰动敏感, 少耕和免耕等保护性耕作措施可以减少土壤扰动, 为土壤动物躲避天敌提供庇护所并改善土壤动物多样性 (Kim *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2021); 跳虫和螨类对食物和水分也很敏感, 通常秸秆覆盖等措施会增加纤维素、半纤维素等有机物, 跳虫和螨类在此土壤微环境下具有更充分的食物资源 (刘宇航等, 2024); 施用有机肥可以通过调节土壤特性 (如土壤团聚体分布、土壤有机质含量和 C/N 比) 来影响线虫多度 (Zhang *et al.*, 2020)。

3.2 东北黑土区农田管理措施对土壤动物分布的影响

基于常规措施和黑土培育措施蚯蚓、螨类、跳虫空间分布图来看, 土壤动物在黑土培育措施下的数量明显高于常规措施。秸秆还田、免耕、施用有机肥等农田管理措施可以增加土壤生物的生存空间, 改善土壤物理结构, 提高土壤肥力 (Zhang *et al.*, 2021), 从而支持土壤动物的生存和进化 (Muhammad *et al.*, 2021)。螨类和跳虫在常规措施和黑土培育措施下均呈西北多、东南少的分布趋势, 但螨类和跳虫的密度在黑土培育措施下均高于常规措施。本研究收集的黑土培育措施主要是保护性耕作和有机物料添加。其中, 保护性耕作能够有效改善土壤环境 (赵乌英嘎等, 2019), 保护性耕作包括秸秆还田条件下土壤水热条件适中, 土壤温度和含水量增加, 容重降低, 使得土壤孔隙度变大, 增加了螨类和跳虫等土壤动物所需的氧气 (刘鹏飞等, 2018), 比常规措施更有利于螨类和跳虫的生存与繁殖; 而有机物料添加较单纯的化肥施用可以更好地提高黑土区土壤质量, 改善中小型土壤动物群落结构, 为中小型土壤动物提供适宜的居住环境 (王文东等, 2019b)。此外, 本研究也发现了蚯蚓在常规措施和黑土培育措施中的分布是不同的。黑土培育措施可明显改变东北黑土区大型土壤动物蚯蚓的分布情况, 结合采样点实施的培育措施, 总结可能有以下 2 个原因, 一是大型土壤动物在不同月份间土壤垂直分布具有明显表聚性, 经过秸秆还田后, 玉米秸秆覆盖于土壤表层, 土壤水热条件适中, 大型土壤动物活动能够加快土壤中有有机肥分解, 为大型土壤动物提高大量的食物资源, 导致大型土壤动物增加 (刘鹏飞等, 2020)。二是土壤养分指标对蚯蚓有积极影响, 许多土壤生物指标在不同程度上受土壤养分指标驱动 (Kang *et al.*, 2023), 土壤养分的富集和再分配随着人为干预 (施肥和耕作) 的程度而变化, 进而影响土壤的生物活动及其空间分布 (Sagha iet *al.*, 2022)。线虫在常规措施和黑土培育措施下的空间分布趋势不同, 线虫多度在常规措施下由低纬度向高纬度逐渐增加, 而在黑土培育措施下由于采样点较少, 根据反距离权重法计算后线虫多度比常规措施小, 土壤线虫是反映环境条件的生物指标, 对环境干扰很敏感, 土壤性质和气候沿地理梯度的变化可能会在区域尺度上造成土壤线虫群落的异质性, 从而导致土壤线虫空间分布模式的形成 (Liu *et al.*, 2019)。

3.3 东北黑土区土壤动物空间分布的影响因素

土壤动物的空间分布受经纬度的影响。在黑土培育措施下, 螨类和跳虫密度的空间分布与纬度显著正相关, 而蚯蚓、螨类、跳虫密度与经度呈显著负相关关系, 即随着经度升高, 土壤动物密度降低。土壤动物空间分布随经度变化的原因是黑土培育措施下土壤动物分布多的地区气候类型以温带大陆性气候为主, 应用黑土培育措施通过增加土壤持水性能 (米洋辰等, 2024), 改变土壤孔隙度, 为土壤动物提供良好的水热协调环境, 进而有利于土壤动物的生存与繁殖。相关性分析结果表明, 土壤 pH 和含水量是影响土壤动物分布的重要因素。其中, 土壤 pH 通常通过影响土壤肥力、养分可利用性和生物活性来影响土壤动物 (Shen *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2023)。在常规措施下土壤 pH 主要影响跳虫密度, 而在黑土培育措施下螨类和跳虫密度的空间分布受土壤 pH 的影响。黑土培育措施下土壤 pH 与螨类和跳虫密度显著正相关, 这是因为保护性耕作和有机物料添加通过增加土壤 pH, 来促进螨类和跳虫的生存与代谢, 进而有利于螨类和跳虫密度的增加 (刘宇航等, 2024)。黑土培育措施下跳虫的空间分布也受土壤含水量的影响, 土壤含水量的增加有利于跳虫密度增加, 但具体到农田生态系统, 还受农田管理措施、土壤养分、施肥等因素的影响, 本研究中跳虫密度在黑土区

西北多于东南,可能是研究点采样季节以及培育措施的不同导致差异性的结果,东南地区其中跳虫密度较低的研究点采样季节在冬季且培育措施采用秸秆覆盖等,造成土壤环境差异较大,土壤动物对温度响应敏感,在温度较低或土壤冻结状态下表现出较低的活性甚至进入休眠状态。冬季气温寒冷致使土壤冻结极大地限制了土壤动物的存活,因此土壤动物在冬季密度较低(张蕊等,2020)。西北地区其中跳虫密度较低的研究点培育措施包括秸秆还田和有机肥与秸秆配施等,其中秸秆还田可以提高土壤含水量,影响不同土层深度的土壤温度,随着秸秆覆盖量的增加,土壤含水量和水分利用效率提高,改善了跳虫的生存环境,进而促使其数量逐渐增多(Liu *et al.*, 2021);有机肥和秸秆配施作为外源碳的投入能够更好地补充土壤有机碳含量,提高有机肥和秸秆的降解,为土壤动物提供充足的食物来源,加快跳虫繁殖(王文东等,2019a)。此外,土壤含水量也是常规措施下影响线虫多度变化的重要环境因子,本研究表明,土壤含水量增加反而使线虫多度降低,通常含水量通过影响土壤湿度和土壤孔隙度来影响线虫多度(代江慧等,2023;杨析,2023)。本研究中,常规措施下收集的线虫采样点采样年限涵盖1998—2018年,土壤含水量变化大,在长春市农安县采样点的研究案例中较低土壤含水量条件下得到的土壤线虫相对多度较高,进而得到土壤含水量增加土壤线虫多度降低的结果,进一步的研究需要收集更多的采样点和研究案例。

4 结 论

与常规措施相比,黑土培育措施促进了大、中、小型土壤动物密度和多样性的增加;螨类与跳虫在常规措施和黑土培育措施下呈现条带状和斑点状的分布规律。土壤动物空间分布随经纬度变化,黑土培育措施下,螨类和跳虫密度随纬度升高而增加,而pH值升高会增加螨类和跳虫数量。研究结果对于利用黑土培育措施保护土壤环境、维持和提高农田土壤动物多样性具有重要的参考意义。

参考文献

- 代江慧, 吴鹏飞, 唐思思, 等. 2023. 降水变化对高寒草甸土壤线虫群落的影响. 生态学报, **43**(22): 9371-9383.
- 傅声雷, 刘满强, 张卫信, 等. 2022. 土壤动物多样性的地理分布及其生态功能研究进展. 生物多样性, **30**(10): 150-167.
- 蒋云峰, 董新月, 李永梅. 2023. 保护性耕作对农田土壤动物群落的影响及其机制. 宁夏农林科技, **64**(1): 39-43.
- 蒋云峰, 马南, 张爽, 等. 2017. 黑土区免耕秸秆不同覆盖频率下大型土壤动物群落结构特征. 生态学杂志, **36**(2): 452-459.
- 刘萍, 刘红文, 张淼, 等. 2022. 典型黑土区农田土壤线虫群落的纬度分布格局及其驱动机制. 生物多样性, **30**(12): 99-109.
- 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 2021. 中国东北黑土区和典型黑土区边界数据集. 全球变化数据仓储电子杂志(中英文). <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.06.08.V1>.
- 刘鹏飞, 红梅, 常菲, 等. 2018. 秸秆还田对黑土区西部农田中小型土壤动物群落的影响. 生态学杂志, **37**(1): 139-146.
- 刘鹏飞, 红梅, 美丽, 等. 2020. 不同玉米秸秆还田量的土壤大型动物夏季群落动态特征. 土壤学报, **57**(3): 760-772.
- 刘宇航, 王滨, 鄢麒宝, 等. 2024. 黑土区玉米农田跳虫和螨类群落特征对耕作和氮肥施用的响应. 土壤通报, **55**(3): 736-745.
- 罗曼丽, 兰琴, 王戈, 等. 2019. 施肥对农田土壤动物群落结构的影响. 浙江农业学报, **31**(6): 946-954.
- 美丽, 红梅, 刘鹏飞, 等. 2018. 有机肥施用对农田中小型土壤动物群落的影响. 中国土壤与肥料, (5): 154-162.
- 米洋辰, 赵政, 王呈玉, 等. 2024. 不同秸秆还田方式对土壤水分特征曲线的影响. 中国农业科技导报, **27**(3): 172-182.
- 盛明, 李佳垚, 雷琬莹, 等. 2025. 耕作方式与秸秆还田量对黑土有机碳组分和肥力指数的影响. 土壤与作物, **14**(1): 53-63.
- 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 2021. 东北黑土地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战. 土壤通报, **52**(3): 695-701.

- 王文东, 红 梅, 刘鹏飞, 等. 2019b. 施用有机肥对黑土区农田大型土壤动物群落的影响. *中国农业大学学报*, **24**(5): 174-184.
- 王文东, 红 梅, 赵巴音那木拉, 等. 2019a. 不同培肥措施对黑土区农田中小型土壤动物群落的影响. *应用与环境生物学报*, **25**(6): 1344-1351.
- 杨 析. 2023. 黄土高原草地土壤动物地理分布及其生态功能研究(博士学位论文). 西安: 西北农林科技大学.
- 杨 旭, 高梅香, 张雪萍, 等. 2017. 秸秆还田对耕作黑土中小型土壤动物群落的影响. *生态学报*, **37**(7): 2206-2216.
- 张 蕊, 李 佳, 高梅香. 2020. 玉米秸秆处理方式对冬季黑土农田蜱螨目和弹尾目群落结构的影响. *生态学报*, **40**(22): 8315-8325.
- 赵乌英嘎, 红 梅, 赵巴音那木拉, 等. 2019. 不同耕作方式下黑土区农田中小型土壤动物群落特征. *水土保持通报*, **39**(3): 39-45.
- Beaumelle L, Thouvenot L, Hines J, *et al.* 2021. Soil fauna diversity and chemical stressors: A review of knowledge gaps and roadmap for future research. *Ecography*, **44**: 845-859.
- Egger M, Smith GD, Schneider M, *et al.* 1997. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. *British Medical Journal*, **315**: 629-634.
- Jiang YF, Xie HT, Chen ZW. 2021. Relationship between the amounts of surface corn stover mulch and soil mesofauna assemblage varies with the season in cultivated areas of northeastern China. *Soil and Tillage Research*, **213**: 105091.
- Kang L, Zhao R, Wu K, *et al.* 2023. Distribution characteristics and influencing factors of soil biological indicators in typical farmland soils. *Land*, **12**: 755.
- Kim N, Zabaloy MC, Guan K, *et al.* 2020. Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. *Soil Biology and Biochemistry*, **142**: 107701.
- Li XL, Wu KN, Hao SH, *et al.* 2023. Mapping of suitable habitats for earthworms in China. *Soil Biology and Biochemistry*, **184**: 109081.
- Liu J, Yang Q, Siemann E, *et al.* 2019. Latitudinal and altitudinal patterns of soil nematode communities under tallow tree (*Triadica sebifera*) in China. *Plant Ecology*, **220**: 965-976.
- Liu L, Zhang L, Liu J, *et al.* 2021. Soil water and temperature characteristics under different straw mulching and tillage measures in the black soil region of China. *Journal of Soil and Water Conservation*, **76**: 256-262.
- Macaskill P, Walter SD, Irwig L. 2001. A comparison of methods to detect publication bias in meta-analysis. *Statistics in Medicine*, **20**: 641-654.
- Muhammad I, Wang J, Sainju UM, *et al.* 2021. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma*, **381**: 114696.
- Qu Y, Pan C, Guo H. 2021. Factors affecting the promotion of conservation tillage in black soil: The case of Northeast China. *Sustainability*, **13**: 9563.
- Saghāi A, Wittorf L, Philippot L, *et al.* 2022. Loss in soil microbial diversity constrains microbiome selection and alters the abundance of N-cycling guilds in barley rhizosphere. *Applied Soil Ecology*, **169**: 104224.
- Shahid M, Nayak AK, Puree C, *et al.* 2017. Carbon and nitrogen fractions and stocks under 41 years of chemical and organic fertilization in a sub-humid tropical rice soil. *Soil and Tillage Research*, **170**: 136-146.
- Shen C, Shi Y, Fan K, *et al.* 2019. Soil pH dominates elevational diversity pattern for bacteria in high elevation alkaline soils on the Tibetan Plateau. *FEMS Microbiology Ecology*, **95**: f03003.
- Shen HY, Shiratori Y, Ohta S, *et al.* 2021. Mitigating N₂O emissions from agricultural soils with fungivorous mites. *The ISME Journal*, **15**: 2427-2439.
- Viechtbauer W. 2010. Conducting Meta-Analyses in R with the meta for package. *Journal of Statistical Software*, **36**: 1-48.
- Xu C, Liu WL, Li JM, *et al.* 2024. Dynamic change of soil aggregate stability and infiltration properties during crop growth under four tillage measures in Mollisols region of northeast China. *Frontiers in Earth Science*, **12**: 1357467.
- Zhang SC, Zhao R, Wu KN, *et al.* 2021. Effects of the rapid construction of a high-quality plough layer based on woody peat in a newly reclaimed cultivated land area. *Agriculture*, **12**: 31.
- Zhang X, Qu J, Li H, *et al.* 2020. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. *Geoderma*, **363**: 114170.

作者简介 王芝云, 女, 2001 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态环境保护与修复. E-mail: zhiyun1126@163.com
责任编辑 魏中青