

DOI: 10.5846/stxb202111053105

杨家伟, 白彤硕, 吴彬, 赵叶新, 裴诗宇, 叶成龙, 胡水金. 秸秆还田对中国农田土壤节肢动物数量及多样性影响的整合分析. 生态学报, 2023, 43(5): 2013–2023.

Yang J W, Bai T S, Wu B, Zhao Y X, Pei S Y, Ye C L, Hu S J. Impacts of straw returning on the number and diversity of soil arthropods in China: A meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2013–2023.

秸秆还田对中国农田土壤节肢动物数量及多样性影响的整合分析

杨家伟¹, 白彤硕¹, 吴彬¹, 赵叶新¹, 裴诗宇¹, 叶成龙^{1,*}, 胡水金^{1,2}

1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095

2 北卡罗来纳州立大学昆虫和植物病理学系, 罗利 27695

摘要: 秸秆还田是提高土壤生物数量和多样性的有效手段, 但土壤节肢动物对秸秆还田的响应尚未明确。搜集 2005 到 2020 年国内有关秸秆还田对农田土壤节肢动物数量及多样性影响的 25 篇田间试验文献, 分别获得 230 对土壤节肢动物数量数据和 112 对土壤节肢动物多样性数据, 并采用整合分析方法探究不同气候类型、土层深度、种植制度、秸秆还田量、还田方式及还田时间下秸秆还田对农田土壤节肢动物数量及多样性的影响。结果表明, 与不还田相比, 秸秆还田总体上显著增加了农田土壤节肢动物的数量, 但在亚热带季风气候区或还田时间大于 5 a 时, 秸秆还田对节肢动物数量的增加效应则不显著; 此外, 秸秆还田对土壤节肢动物数量的促进作用还受到节肢动物体型的影响, 秸秆还田显著增加土壤中小型节肢动物的数量, 特别是蜱螨目类土壤节肢动物, 但是对大型土壤节肢动物的促进作用并不显著。秸秆还田总体上也提高了农田土壤节肢动物的多样性, 特别是在温带季风气候、年均温小于 5 °C、年均降水量小于 600 mm、秸秆还田量大于 10000 kg/hm²、轮作以及还田时间大于 5 a 这些条件下, 秸秆还田能显著提高土壤节肢动物的多样性。回归分析结果显示随着秸秆还田时间的增加, 土壤节肢动物数量的增加率显著降低, 而随着秸秆还田量的增加, 节肢动物数量的增加率则显著升高; 节肢动物多样性的增加率随着年均降水量的增加显著降低, 而随着秸秆还田时间和还田量的增加显著升高。以上结果表明, 秸秆还田有助于提高农田土壤节肢动物的数量和多样性, 但此效应会受到气候因子及农田管理方式的影响。

关键词: 秸秆还田; 土壤节肢动物; 数量; 多样性; 整合分析

Impacts of straw returning on the number and diversity of soil arthropods in China: A meta-analysis

YANG Jiawei¹, BAI Tongshuo¹, WU Bin¹, ZHAO Yexin¹, PEI Shiyu¹, YE Chenglong^{1,*}, HU Shuijin^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Department of Entomology and Plant Pathology, North Carolina State University, Raleigh 27695, USA

Abstract: Straw returning is an effective way to enhance the number and diversity of soil organisms, but the responses of soil arthropods to straw returning are still unclear. In this study, we conducted a meta-analysis involving 230 comparisons of soil arthropod number and 112 comparisons of soil arthropod diversity collected from 25 related literatures during 2005–2020. The objectives of this study are to assess the effects of straw returning on the number and diversity of soil arthropods in agroecosystems of China, as well as the variation of these effects under different climates, soil depths, cropping systems, straw returning amounts, straw returning methods and time. The results showed that straw returning significantly increased

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20200552); 国家自然科学基金项目 (32001181); 江苏省博士后基金项目 (2020Z201); 南京农业大学中央高校基本业务费项目 (KJQN202113)

收稿日期: 2021-11-05; 网络出版日期: 2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenglongye@njau.edu.cn

the number of soil arthropods compared with no straw returning, except the studies conducted at subtropical monsoon climate regions, or the time of straw returning was more than 5 a. In addition, the promotional effect of straw returning on soil arthropod number was also affected by the size of arthropods, with straw returning significantly increasing the number of small and medium-sized soil arthropods, especially acari, rather than large soil arthropods. Straw returning also had a tendency to increase the diversity of soil arthropods, and this effect was significant under the conditions of temperate monsoon climates, mean annual temperature less than 5 °C, mean annual precipitation less than 600 mm, rotation cropping, amount of straw returning more than 10000 kg/ hm² and straw returning time more than 5 a. The regression analysis showed that the increased rate of soil arthropod number under straw returning significantly decreased with straw returning time, but it significantly increased with straw returning amount; the increased rate of soil arthropod diversity under straw returning decreased significantly with mean annual precipitation, but it significantly increased with straw returning amount and time. Together, these results indicated that straw returning could improve the number and diversity of soil arthropods, which could be affected by climate factors and agricultural managements.

Key Words: straw returning; soil arthropods; quantity; diversity; meta-analysis

我国作为世界人口大国,粮食需求量巨大,保证粮食稳定安全的供应至关重要。当前,面对人口日益增长和耕地日益减少的趋势及严峻的气候变化等问题,我国亟需高质量的农田来保证农作物产量稳定甚至达到高产水平^[1-2]。为了提高土壤肥力并减少化肥使用带来的环境问题,秸秆还田配施化肥已成为我国普遍应用的提高土壤质量、改善土壤结构以及提升作物产量的有效手段^[3-5]。同时,秸秆还田还可以有效降低农田秸秆焚烧率,减少大气污染并增加土壤碳固定,具有减缓气候变化的潜力^[6-8]。然而,秸秆还田的量、方式(覆盖或填埋)和不同农业区的气候条件等都可能影响秸秆对农田土壤质量的提升效果^[9-10]。因此,合理评价秸秆还田对土壤质量和土壤生态系统的影响对于科学利用秸秆资源具有重要意义。

尽管土壤的物理、化学和微生物学性质是当前土壤质量评价的广泛使用指标,但是研究人员已经逐步认识到土壤动物也是评价土壤质量的重要指标之一^[11-12]。这是因为土壤动物占据土壤食物网中多个营养级,既是消费者也是分解者,其与土壤微生物相互作用,在凋落物分解、养分转化和能量传递过程中起到关键作用^[13-14]。此外,土壤动物的挖穴与排便等行为可以改善土壤结构,有助于植物根系伸展和养分吸收^[15-16]。目前,关于土壤动物评价土壤质量的研究大部分集中于土壤线虫,对土壤节肢动物的相关报道相对较少^[17-19]。与线虫类似,土壤节肢动物也是土壤动物群落中重要的组成部分,其不仅具有与土壤线虫相似的特征,如数量多、繁殖快和对环境变化敏感等,还具有破碎凋落物的能力,能加速凋落物的分解并提高土壤养分的矿化速率^[20-22]。因此,土壤节肢动物是评价秸秆还田下土壤质量的可行指标。同时,也应该把土壤节肢动物作为一种资源并通过恰当的农业管理措施来加以保护,以充分发挥其在农田生态系统中的生态服务功能。

秸秆还田在理论上有利于土壤节肢动物的生长繁殖,但在已有的报道中结果并不一致。张婷等^[23]和徐演鹏等^[24]研究发现秸秆可以作为节肢动物的主要食物来源,改善土壤节肢动物的栖息条件,从而显著提高土壤节肢动物的数量和多样性;张庆宇等^[25]则指出秸秆还田对土壤节肢动物多样性的影响并不显著;而杨旭等^[26]发现秸秆分解过程对土壤节肢动物生长和繁殖产生负面影响,导致其数量减少。这表明土壤节肢动物对秸秆还田的响应可能会受到气候条件、农田作物类型以及秸秆还田方式等因素的影响。然而,关于秸秆还田对土壤节肢动物影响的研究多是基于某些特定试验点,研究结果只能回答特定条件下秸秆还田的效果。因此,在全国范围内系统分析秸秆还田对农田节肢动物的影响十分必要且迫切。

本研究通过整合分析的手段,探究不同气候类型、还田条件、种植制度等条件下秸秆还田对农田土壤节肢动物数量和多样性的影响,对全国范围内的秸秆还田独立试验结果进行综合分析,为我国农田秸秆的科学还田提供一定的参考依据。

1 材料和方法

1.1 数据收集

以“秸秆”“秸秆还田”“节肢动物”和“土壤动物”为关键词,在中国知网和万方中文文献数据库中检索于2020年12月31日之前发表的相关论文,然后根据以下标准筛选论文:(1)田间试验的范围为中国大陆地区;(2)试验需包含处理组(秸秆还田)和对照组(秸秆不还田);(3)文献中有明确的试验重复数以及各试验处理的结果均值;(4)文献中的数据需包含土壤节肢动物总数、不同类群土壤节肢动物数量或百分比以及土壤节肢动物的香农多样性指数。经筛选,共获得25篇相关文献(表1),研究站点的地理位置见图1。

表1 整合分析中25项研究所在地区的气候特征

Table 1 The climatic characteristics of the research sites extracted from the 25 literatures in this meta-analysis

地点 Sites	年平均温度 Mean annual temperature/°C	年平均降水量 Mean annual precipitation/mm	气候类型 Climate	参考文献 References
四川省都江堰市蒲阳镇 Puyang Town, Dujiangyan City, Sichuan Province	15	1243.8	亚热带季风气候	苟丽琼等 ^[28] 罗曼丽等 ^[29] 杨佩等 ^[30]
吉林省四平市梨树县 Lishu County, Siping City, Jilin Province	5.8	577.2	温带季风气候	蒋云峰等 ^[31] 马南等 ^[32]
河南省周口市 Zhoukou City, Henan Province	15.6	600—1000	温带季风气候	李淑梅等 ^[33]
陕西省咸阳市杨陵区 Yangling District, Xianyang City, Shaanxi Province	13	550—600	温带季风气候	林英华等 ^[34]
吉林省德惠市 Dehui City, Jilin Province	4.4	520	温带季风气候	李泽兴等 ^[35] 连旭等 ^[36] 刘鹏飞等 ^[37]
内蒙古兴安盟扎赉特旗 Jalaid Banner, Hinggan League, Inner Mongolia	3.24	400	温带大陆气候	刘鹏飞等 ^[38] 王文东等 ^[39] 林英华等 ^[40]
吉林省公主岭市 Gongzhuling City, Jilin Province	5—6	500—650	温带季风气候	
黑龙江省海伦市西郊 Western suburb, Hailun City, Heilongjiang Province	1.5	500	温带季风气候	孙涛等 ^[41] 战丽莉等 ^[42]
天津市宁河区 Ninghe District, Tianjin City	11.2	642	温带季风气候	吴宪等 ^[43]
吉林省公主岭市范家屯镇 Fanjiatun Town, Gongzhuling City, Jilin Province	5—6	500—650	温带季风气候	徐演鹏等 ^[24]
黑龙江省海伦市 Hailun City, Heilongjiang Province	1.5	500—650	温带季风气候	杨迪等 ^[44]
吉林省延边朝鲜族自治州龙井市 Longjing City, Yanbian Korean Autonomous Prefecture, Jilin Province	5.2	549.3	温带季风气候	张庆宇等 ^[25]
重庆市北碚区 Beibei District, Chongqing City	18.3	1105	亚热带季风气候	张赛等 ^[45]
天津市南开区 Nankai District, Tianjin City	11.6	520—660	温带季风气候	张婷等 ^[23]
河南省封丘县 Fengqiu County, Henan Province	13.9	605	温带季风气候	朱强根等 ^[46]
四川省盐亭县林山乡 Linshan Village, Yanting County, Sichuan Province	17.13	826	亚热带季风气候	朱新玉等 ^[47] 周育臻 ^[48]
山西省临汾市城隍村 Chenghuang Village, Linfen City, Shanxi Province	9.13	515	温带季风气候	李红娟 ^[49]

从文献中提取可能对土壤节肢动物数量及多样性产生影响的相关信息;环境因子(包括气候类型、年平均温度、年平均降水量)、秸秆指标(包括秸秆还田量、还田方式和还田时间)、种植制度、土层深度。其中,表格中的数据直接提取,图形中的数据则使用 GetData Graph Digitizer 2.24 进行提取。对于所有变量,从研究中提取平均值、标准差和试验重复数,在没有给出标准差的情况下,将标准差指定为平均值的 $1/10^{[27]}$ 。最终分别得到 230 和 112 组实验数据用于秸秆还田对土壤节肢动物数量和多样性影响的整合分析。

1.2 数据处理

本研究采用随机效应模型计算秸秆还田对农田土壤节肢动物数量及多样性的效应,选取生态学领域常用的响应比(RR)的自然对数($\ln RR$)作为整合(Meta)分析的效应值^[50],来定量衡量秸秆还田对土壤节肢动物数量及多样性的影响。具体的计算公式如下:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{x_t}{x_c} \right) \quad (1)$$

式中, $\ln RR$ 为效应值, x_t 和 x_c 分别表示秸秆还田处理和秸秆不还田处理下土壤节肢动物总数、各类群的数量或土壤节肢动物多样性的平均值。

再对每项独立研究的效应值进行加权计算,得到加权平均效应值 $\ln RR_{++}$ 。计算时,需要确定每项独立研究的方差 V_i 和权重 W_i ,具体计算公式如下:

$$V_i = \frac{SD_t^2}{N_t x_t} + \frac{SD_c^2}{N_c x_c} \quad (2)$$

$$W_i = \frac{1}{V_i} \quad (3)$$

$$\ln RR_{++} = \frac{\sum (\ln RR_i \times W_i)}{\sum W_i} \quad (4)$$

式中, SD_t 与 SD_c 分别为秸秆还田和秸秆不还田处理下土壤节肢动物各项数据的标准差, N_t 与 N_c 分别为秸秆还田和秸秆不还田处理的试验重复数。

加权平均效应值的 95% 置信区间(95%CI)通过 t 分布^[51] 进行计算:

$$95\% \text{ CI} = \ln RR_{++} \pm (t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)) \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

式中, $t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$ 为根据二分之一置信度表得到的 t 值, S 表示样本标准差, n 表示样本数。

若加权平均效应值的 95% 置信区间均大于 0, 表明秸秆还田对土壤节肢动物数量及多样性的影响呈显著正效应;若均小于 0, 表明秸秆还田对土壤节肢动物存在显著负效应;若 95% 置信区间与 0 重叠, 则表明秸秆还田对土壤节肢动物无显著影响。

最后,将加权平均效应值 $\ln RR_{++}$ 通过公式 $(e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100\%$ 转换为加权平均变化率,可以更直观地反映秸秆还田在不同条件下对土壤节肢动物数量及多样性的影响效果^[52]。

1.3 统计分析

首先,使用 Excel 2019 建立秸秆还田对土壤节肢动物数量及多样性影响的数据库。然后,采用卡方检验对研究间的异质性^[53] 进行分析,若检验结果 $P > 0.05$, 说明不同研究结果间具有同质性,可选用固定效应模型

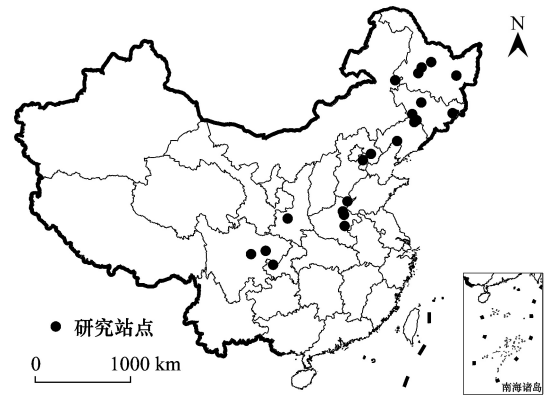


图1 整合分析中研究地点在国内的地理分布

Fig.1 Geographical distribution of research sites in China in this meta-analysis

计算并合并统计量,否则采用随机效应模型^[54]。同时,采用失安全系数^[55]来判断偏倚性问题,失安全系数的阈值是 $5n+10$,其中 n 为 Meta 分析的数据量,当失安全系数低于阈值时表明该研究存在偏倚性问题^[56]。最后,采用一般线性回归模型分析秸秆还田后土壤节肢动物数量和多样性的变化率与气候因子、秸秆还田量和还田时间之间的相关性。在 OpenMEE 和 R 4.0.3 软件上实现统计分析过程。

2 结果与分析

2.1 数据异质性及偏倚性分析

异质性检验结果表明,各试验数据间存在显著异质性($P<0.001$),因此选用随机效应模型。本研究中节肢动物数量和多样性数据的失安全系数分别为 273779 ($>5n+10$, 1165) 和 793 ($>5n+10$, 575),其统计学意义为分别至少需要 273779 和 793 组具有偏倚性的研究数据才能改变本研究的结论,所以本研究所用数据不存在偏倚。

2.2 秸秆还田对农田土壤节肢动物数量的影响

从总体上看,与秸秆不还田相比,秸秆还田能显著提高土壤节肢动物的数量(图 2; $P<0.001$),但在不同气候类型、土层深度、种植制度、秸秆还田量、还田方式及还田时间下,该效应的显著性与强度均有所不同。秸秆还田在温带季风气候和温带大陆气候下对土壤节肢动物数量的增加效果显著($P<0.001$),并且在温带大陆气候下增幅最大,为 76.65%,但在亚热带季风气候下该效应不显著($P=0.16$);不同年均温和年均降水条件下,

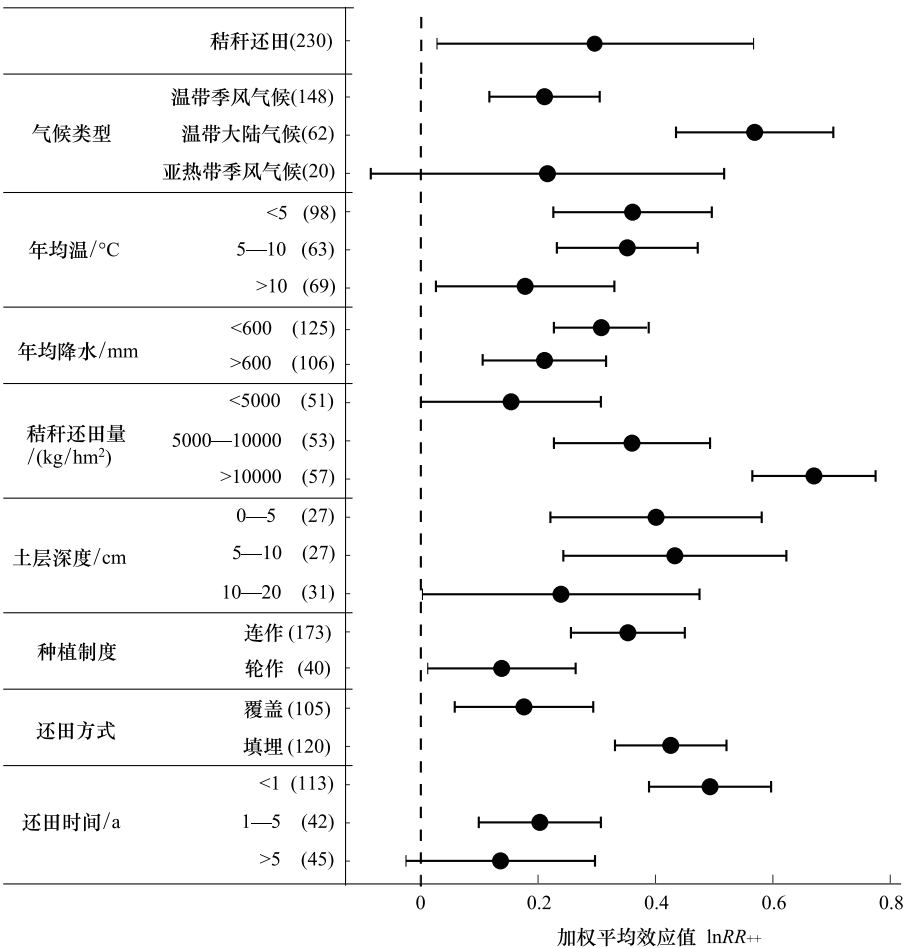


图 2 整合分析不同条件下秸秆还田对土壤节肢动物数量的影响

Fig.2 Effects of straw returning on the number of soil arthropods under different conditions in this meta-analysis

括号内数字为独立研究数量

秸秆还田对土壤节肢动物的数量增加效应均显著 ($P < 0.001$), 并分别在年均温小于 5°C 和年均降水小于 600 mm 时达到最大, 增幅为 43.48% 和 34.85% ; 秸秆还田对土壤节肢动物数量增长的促进效应在还田量大于 10000 kg/hm^2 时最佳, 增加率为 95.42% ($P < 0.001$); 秸秆还田对不同土层中土壤节肢动物的增加效果均显著 ($P < 0.001$), 但在深层土壤 ($10\text{--}20\text{ cm}$) 中土壤节肢动物的增加幅度较低, 仅为 27% ($P = 0.048$)。

不同的种植制度和秸秆还田方式均能显著提升秸秆还田下土壤节肢动物的数量 ($P < 0.001$), 并以连作和秸秆填埋这两种条件下土壤节肢动物数量的增加率最高, 分别达到 42.33% 和 53.11% 。而随着秸秆还田时间的增加, 土壤节肢动物数量的增加率会逐渐降低。秸秆还田时间小于 1 a 时, 其增幅高达 63.72% ($P < 0.001$); 还田年限在 $1\text{ 至 }5\text{ a}$ 之间时, 其增加率仅为 22.51% ($P < 0.001$); 当还田时间大于 5 a 时, 秸秆还田对土壤节肢动物数量增加的促进效应则不显著 ($P = 0.097$)。

农田土壤节肢动物对秸秆还田的响应还受其体型和类群的影响 (图 3)。秸秆还田显著促进了中小型土壤节肢动物的数量, 增幅为 38.68% ($P < 0.001$), 而对大型土壤节肢动物的影响则不显著 ($P = 0.26$)。在 6 种主要土壤节肢动物的类群中, 只有蜱螨目对秸秆还田的响应显著, 增幅为 69.83% ($P < 0.001$)。

2.3 秸秆还田对农田土壤节肢动物多样性的影响

秸秆还田在总体上显著增加了土壤节肢动物的多样性 (图 4; $P = 0.048$), 但该效应的显著性和强度在不同气候类型、种植制度、秸秆还田量、还田方式及还田时间下有所差别。

对于不同气候类型, 只有在温带季风气候区秸秆还田后土壤节肢动物的多样性显著增加, 增加率为 6.29% ($P = 0.001$), 而在温带大陆气候和亚热带季风气候下则不显著; 在年均温低于 5°C 或年降水量小于 600 mm 的环境下, 秸秆还田显著提升土壤节肢动物的多样性, 提升幅度分别为 10.41% 和 6.93% ($P < 0.001$), 而在其他温度和降水条件下则不显著; 并且, 土壤节肢动物的多样性仅在秸秆还田量大于 10000 kg/hm^2 或还田年限大于 5 a 时显著增加, 其增幅分别达到 7.36% ($P = 0.013$) 和 13.66% ($P < 0.001$); 轮作条件下秸秆还田显著提高土壤节肢动物的多样性 ($P < 0.001$), 增加率为 12.86% , 而连作条件下土壤节肢动物多样性的增加则不显著 ($P = 0.069$)。无论秸秆覆盖还田还是填埋还田, 其对土壤节肢动物多样性的影响也均不显著。

2.4 节肢动物数量和多样性变化率与气候因子、秸秆还田时间及还田量的关系

由图 5 可知, 秸秆还田后, 土壤节肢动物数量的增加率与秸秆还田时间呈显著负相关 ($P = 0.026$), 而与秸秆还田量呈显著正相关 ($P = 0.006$); 土壤节肢动物多样性的增加率与年平均降水量呈显著负相关 ($P = 0.008$), 而与秸秆还田时间 ($P = 0.009$) 和还田量 ($P = 0.029$) 呈显著正相关。

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤节肢动物数量的影响

整合分析结果显示, 秸秆还田对农田土壤节肢动物数量的影响总体上表现为显著增加。这主要是因为秸秆富含纤维素、半纤维素等有机物, 可为土壤节肢动物补充食物来源^[57]。同时, 秸秆还田可以减少土壤水分蒸发和热量散失, 提高土壤保水性并减缓土壤温度波动, 并为土壤节肢动物躲避天敌提供庇护所^[58–59]。因此, 充足的资源和良好的生存环境为土壤节肢动物生长繁殖提供了适合的条件。然而, 秸秆还田对土壤节肢

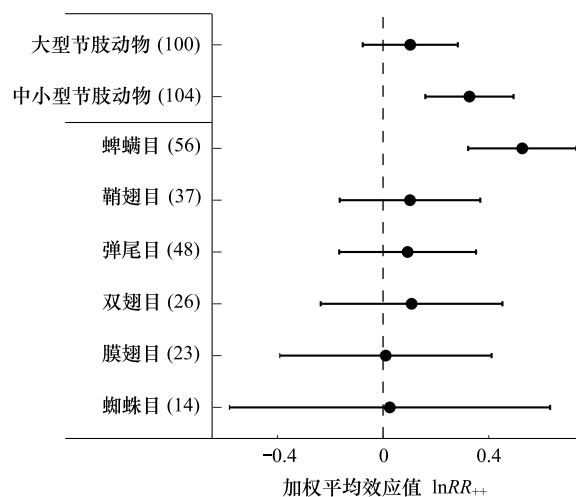


图 3 整合分析秸秆还田对不同类群土壤节肢动物数量的影响
Fig.3 Effects of straw returning on the number of soil arthropods with different groups in this meta-analysis

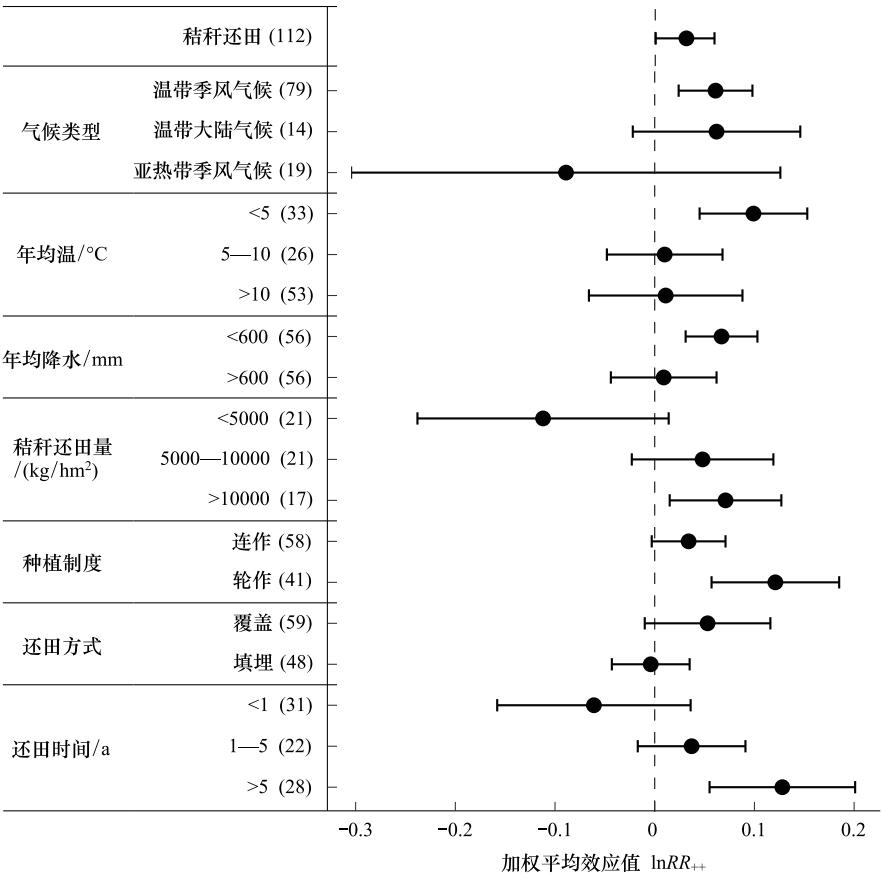


图 4 整合分析不同条件下秸秆还田对土壤节肢动物多样性的影响

Fig.4 Effects of straw returning on the diversity of soil arthropods under different conditions in this meta-analysis

动物数量的增加效果会受到气候条件、土层深度、种植制度、秸秆还田量、还田方式及还田时间的影响。

在温带季风气候和温带大陆气候区,秸秆还田能显著提高农田土壤节肢动物的数量,且在温带大陆气候下增加效果最佳,而在亚热带季风气候区却不显著。同时,还发现在年均温小于 5 °C 及年降水量小于 600 mm 的条件下秸秆还田对土壤节肢动物数量的提升效果要优于其他条件。以上结果表明土壤节肢动物对秸秆还田的响应与当地气候密切相关,并且在水热条件较差的气候区,秸秆还田更有利于土壤节肢动物的生长繁殖。这是由于秸秆还田在水热条件较差地区对土壤起到的保墒和保温效果比其他地区更显著,能有效改善当地土壤的水分和温度条件,为土壤节肢动物创造有利的生存环境^[60]。而在原始水热条件良好的地区,秸秆还田可能对土壤环境条件的改善作用有限,导致了土壤节肢动物对秸秆还田的响应不显著。同时,相关性分析发现土壤节肢动物的数量随秸秆还田量的提升而显著增加,表明食源的增加能有效促进土壤节肢动物数量的增长。

秸秆还田对土壤节肢动物数量增长的促进强度随着土层深度的增加而降低。这或归因于以下两点:第一,土壤节肢动物具有表聚性,喜欢生活在对其生长发育、繁殖后代有利的表层土中^[61],而且无论是秸秆覆盖还是填埋,表层土壤受到秸秆的影响最大,因此,表层土中的土壤节肢动物更容易接触秸秆,获取更丰富的食物资源^[26];第二,随着土层深度的增加,土壤容重增大,孔隙度降低,土壤节肢动物所能获得的食物和氧气等必要资源减少,这些因素均限制了深层土壤节肢动物数量的增加^[39]。

连作制度下秸秆还田对土壤节肢动物数量增长的促进作用大于轮作,这表明种植制度也是影响土壤节肢动物对秸秆还田响应的重要因素。尽管轮作有利于均衡利用土壤养分,调节土壤肥力,但与连作相比,轮作对土壤环境的干扰较大^[62]。轮作系统中不同作物根系的生长过程存在显著差异,根系分泌物等物质会直接影

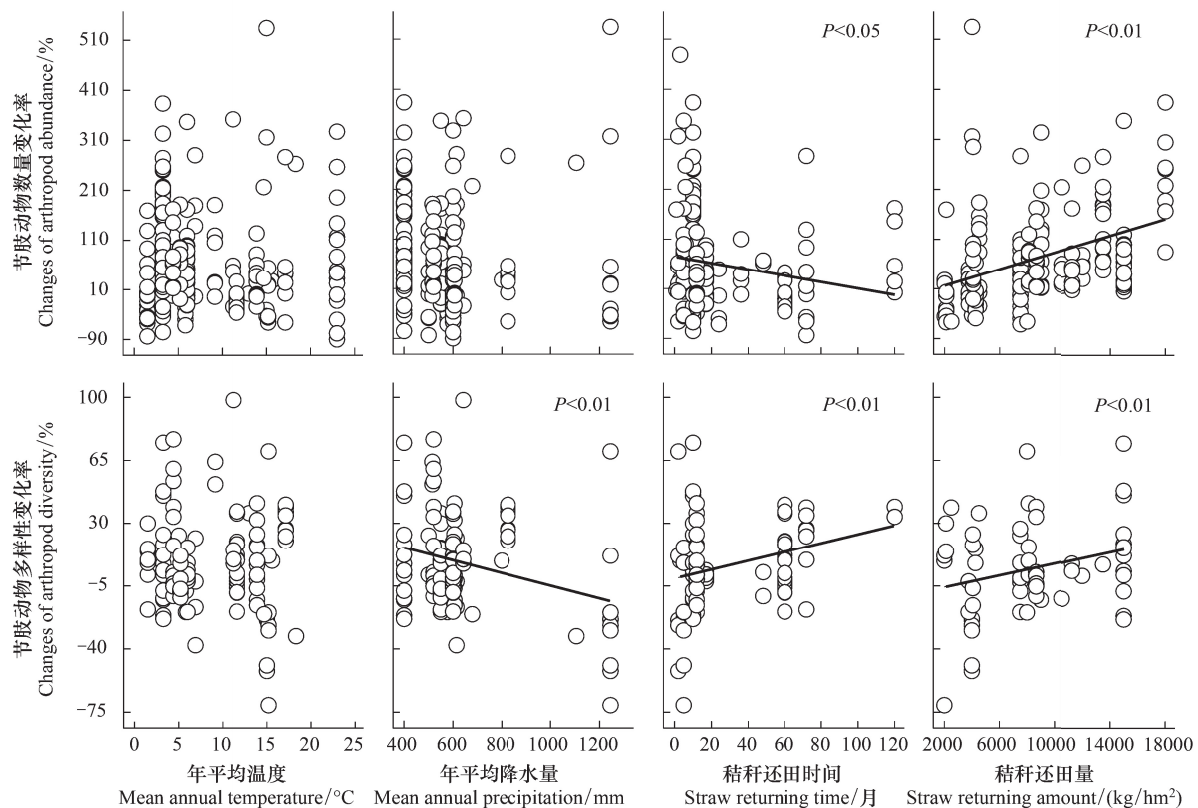


图5 秸秆还田条件下土壤节肢动物数量和多样性的增加率与气候因子、秸秆还田时间以及还田量的关系

Fig.5 The relationships of the increasing rates of soil arthropod number and diversity under straw returning with climate factors, straw returning time and amount

响优势节肢动物存活状态,也会使土壤理化性质形成差异,而土壤节肢动物对外界环境的变化非常敏感,所以土壤理化性质的变化会显著影响土壤节肢动物中优势类群的存活^[63-64]。而连作系统下的秸秆还田对土壤扰动少,土壤节肢动物的生存不易受到影响,其数量也相对较多。

尽管不同的还田方式均显著增加了土壤节肢动物的数量,但秸秆填埋还田对土壤节肢动物数量的增加效应优于覆盖还田。这是由于秸秆填埋能使秸秆与土壤充分混合,促进土壤中土壤节肢动物与秸秆接触,使土壤节肢动物更易获取食物资源;并且秸秆填埋过程中对土壤的翻动可以增加土壤孔隙度,促进表层土壤中空气的进入和流通,有利于土壤节肢动物的生存和活动^[65]。

秸秆还田对节肢动物数量增长的促进作用随秸秆还田时间的延长而降低,特别是当还田时间超过5 a后,秸秆还田对土壤节肢动物数量的增加效应不再显著。这是因为在分解后期秸秆中残存的难降解物质无法为土壤节肢动物提供充足的食物;同时,多年的秸秆堆积也可能导致土壤中病原微生物增殖,不利于土壤节肢动物的生长繁殖^[66]。

本研究中,中小型土壤节肢动物的数量在秸秆还田后显著增加。这可能是由于中小型土壤节肢主要栖息于土壤表层,且世代周期短,繁殖速度快,秸秆还田后一方面可以为其提供充足的食源,另一方面改善表层土壤结构,显著刺激中小型土壤节肢动物的繁殖^[67-68]。尽管秸秆还田也能为大型土壤节肢动物提供食源,但其世代周期相对较长、繁殖速率较低、抗干扰能力较弱,可能导致其对秸秆还田响应不显著。此外,de Souza等^[69]研究表明大型土壤节肢动物的数量取决于土壤有机质的持续输入、植物成分和植被类型。de Melo等^[70]进一步指出种植豆科作物可以促进农田大型土壤节肢动物的繁殖,而非豆科对大型土壤节肢动物的影响不显著,这表明大型土壤节肢动物可能偏好取食含氮高的秸秆。考虑到本研究整合的田间试验主要在小麦

和玉米农田系统中开展,整合分析结果进一步暗示农田作物类型是影响大型土壤节肢动物生长繁殖的重要因素之一。还发现在 6 种主要类群中,中小型蜚蠊目类节肢动物对秸秆还田的响应最为显著,这是由于蜚蠊目不仅具有中小型土壤节肢动物的特点,还具有硬化的外骨骼,对自身的保护能力强,能更好的适应环境变化^[71]。

3.2 秸秆还田对土壤节肢动物多样性的影响

秸秆还田对农田土壤节肢动物多样性的影响总体表现为显著增加,这表明秸秆还田有助于农田土壤形成稳定且完善的环境,提高节肢动物类群的丰富度^[42]。但在不同的气候条件、种植制度、秸秆还田量、还田方式及还田时间下,该效应的显著性和强度各不相同。

在温带季风气候区,秸秆还田能显著增加农田土壤节肢动物的多样性。同样地,在年均温低于 5℃ 以及年均降水量小于 600 mm 的条件下,土壤节肢动物的多样性在秸秆还田后也得到显著提升,并且相关性分析表明土壤节肢动物的多样性随年均降水量的降低而显著提升。这是由于在气候较为严苛地区,长期受温度和水分的限制,使秸秆还田所带来的保水保温效果相较于其他地区更显著,秸秆覆盖后形成的稳定水热条件适宜不同类群的土壤节肢动物生长繁殖^[72-73]。秸秆大量还田也显著增加土壤节肢动物多样性,这与李泽兴等^[35]提出的有机质含量和节肢动物多样性呈显著正相关性的结论相符。随着秸秆还田量的提升,土壤中纤维素等有机质含量逐渐增加,为不同类群的土壤节肢动物提供充足的资源,同时丰富的食源也扩大了农田中捕食性节肢动物的类群,表层土壤食物网逐渐完整,土壤生境系统更为完善,适宜不同种类土壤节肢动物的生存繁衍^[74-75]。

秸秆还田后土壤中节肢动物的多样性在轮作的种植制度下也显著提高。这是因为轮作方式下的秸秆还田向农田土壤中输送各种有机质,不同的资源满足各类土壤微生物和节肢动物的生长需求,土壤节肢动物又主要取食微生物和有机质,土壤微生物和食源多样性的增加提高了节肢动物的多样性^[76-77]。同样地,在较长年限的秸秆还田后,农田土壤节肢动物的多样性得到显著增长。这是由于多年连续的秸秆施用后,大部分凋落物处于分解后期,其难分解组分的比例和腐殖化程度不断提高,此时腐食性节肢动物类群在土壤食物网中占据重要地位,不同功能类群的参与加强了土壤生态系统物质循环和营养流过程,有利于各类土壤节肢动物的生长发育^[9,78]。

4 结论

秸秆还田能有效增加农田土壤节肢动物的数量和多样性,但在不同气候条件、土层深度、种植制度、秸秆还田量、还田方式和还田时间以及不同类群土壤节肢动物中,该效应的显著性和强度有所不同。总体来看,在水热条件较差的气候区以及还田量大的情况下,秸秆还田更有利于以蜚蠊目为主的土壤节肢动物的数量和多样性的增加。本研究的结果表明秸秆还田是促进农田土壤节肢动物生长繁殖的有效手段之一,这对科学利用秸秆来提升农田土壤质量和维持土壤生态系统的良好运行具有积极意义。

参考文献 (References):

- [1] 陈睿山,郭晓娜,熊波,王尧,陈琼. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. 生态学报, 2021, 41(7): 2918-2929.
- [2] 赵其国,周生路,吴绍华,任奎. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策. 土壤学报, 2006, 43(4): 662-672.
- [3] 李玮,乔玉强,陈欢,曹承富,杜世州,赵竹. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦—玉米产量的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 5052-5061.
- [4] 杨滨娟,黄国勤,徐宁,钱海燕. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响. 生态学报, 2014, 34(13): 3779-3787.
- [5] 田慎重,王瑜,李娜,宁堂原,王丙文,赵红香,李增嘉. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124.
- [6] 袁新田,朱玲,焦加国,刘满强,李辉信,胡锋. 施用玉米秸秆和接种蚯蚓后几种土壤活性有机碳的动态变化. 生态学报, 2010, 30(19): 5264-5271.
- [7] 王如芳,张吉旺,董树亭,刘鹏. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504-1510.
- [8] 冯伟,张利群,庞中伟,郭淑珍. 中国秸秆废弃焚烧与资源化利用的经济与环境分析. 中国农学通报, 2011, 27(6): 350-354.

- [9] 刘鹏飞, 红梅, 美丽, 赵巴音那木拉, 德海山, 白雪原, 李志新, 马玺. 玉米秸秆还田量对黑土区农田地面节肢动物群落的影响. 生态学报, 2019, 39(1): 235-243.
- [10] 吴俊松, 刘建, 刘晓菲, 杨海水, 王小华, 许明敏, 魏亚凤, 卞新民. 稻麦秸秆集中沟埋还田对麦田土壤物理性状的影响. 生态学报, 2016, 36(7): 2066-2075.
- [11] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [12] Yan S K, Singh A N, Fu S L, Liao C H, Wang S L, Li Y L, Cui Y, Hu L L. A soil fauna index for assessing soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 158-165.
- [13] Carrillo Y, Ball B A, Bradford M A, Jordan C F, Molina M. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1440-1449.
- [14] Bardgett R D, Chan K F. Experimental evidence that soil fauna enhance nutrient mineralization and plant nutrient uptake in montane grassland ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(7): 1007-1014.
- [15] Maaß S, Caruso T, Rillig M C. Functional role of microarthropods in soil aggregation. *Pedobiologia*, 2015, 58(2/3): 59-63.
- [16] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明. 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. 土壤学报, 2006, 43(2): 314-323.
- [17] 叶成龙, 刘婷, 张运龙, 张俊伶, 沈其荣, 李辉信. 麦地土壤线虫群落结构对有机肥和秸秆还田的响应. 土壤学报, 2013, 50(5): 997-1005.
- [18] 张晓珂, 梁文举, 李琪. 我国土壤线虫生态学研究进展和展望. 生物多样性, 2018, 26(10): 1060-1073.
- [19] 牟文雅, 贾艺凡, 陈小云, 刘满强, 周可新, 李俊生, 陈法军. 玉米秸秆还田对土壤线虫数量动态与群落结构的影响. 生态学报, 2017, 37(3): 877-886.
- [20] Zhang K L, Maltais-Landry G, Liao H L. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108-219.
- [21] Bokhorst S, Wardle D A. Microclimate within litter bags of different mesh size: implications for the 'arthropod effect' on litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 147-152.
- [22] Thakur M P, van Groenigen J W, Kuiper I, De Deyn G B. Interactions between microbial-feeding and predatory soil fauna trigger N₂O emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 256-262.
- [23] 张婷, 孔云, 李刚, 杨殿林, 赵建宁, 张贵龙, 王丽丽, 修伟明. 不同秸秆还田量对华北小麦—玉米体系土壤中小型节肢动物的影响. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 70-75.
- [24] 徐演鹏, 谭飞, 胡彦鹏, 卢萍, 吴建平, 林英华. 秸秆还田对黑土区农田中小型土壤节肢动物群落的影响. 动物学杂志, 2015, 50(2): 262-271.
- [25] 张庆宇, 黄初女, 王光达, 丁洪玲, 李永一, 安金花. 秸秆还田对水田改旱田地玉米产量及地下大型土壤动物群落的影响. 延边大学学报, 2013, 35(4): 335-342.
- [26] 杨旭, 高梅香, 张雪萍, 林琳, 沙迪, 张利敏. 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, 2017, 37(7): 2206-2216.
- [27] Zhou Z H, Wang C K, Luo Y Q. Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: a global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(1/2): 110-124.
- [28] 苟丽琼, 姚恒, 王戈, 黄如成, 段均华, 肖玖金, 张健. 稻草不同还田方式对土壤动物群落结构的影响. 浙江农业学报, 2019, 31(3): 450-457.
- [29] 罗漫丽, 段均华, 姚恒, 卢昌泰, 肖玖金, 张健. 稻草不同还田量对土壤动物群落结构的影响. 浙江农林大学学报, 2020, 37(1): 85-92.
- [30] 杨佩, 王海霞, 岳佳. 秸秆覆盖免耕条件下中小型土壤动物的生态分布特征. 水土保持研究, 2013, 20(2): 145-150.
- [31] 蒋云峰, 马南, 张爽, 陈智文, 解宏图. 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, 2017, 36(2): 452-459.
- [32] 马南, 钱瑞雪, 杨慧敏, 陈智文, 蒋云峰. 免耕留茬耕作对中小型土壤动物群落的影响. 浙江农业学报, 2018, 30(5): 825-831.
- [33] 李淑梅, 史留功, 李青芝. 不同施肥条件下农田土壤动物群落组成及多样性变化. 安徽农业科学, 2008, 36(7): 2830-2831, 2989-2989.
- [34] 林英华, 杨学云, 张夫道, 古巧珍, 孙本华, 马路军. 长期施肥对黄土区农田土壤动物群落的影响. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1213-1218.
- [35] 李泽兴, 孙光芝, 王洋, 吴东辉. 玉米秸秆覆盖量对农田土壤动物群落结构的影响. 中国农学通报, 2010, 26(16): 296-300.
- [36] 连旭, 隋玉柱, 武海涛, 刘冬, 郝敏, 管强. 秸秆还田对黑土农田土壤甲螨群落结构的影响. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 134-142.
- [37] 刘鹏飞, 红梅, 常菲, 高海燕, 李志新, 马玺. 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, 2018, 37(1): 139-146.
- [38] 刘鹏飞, 红梅, 美丽, 王文东, 赵乌英嘎, 李志新. 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, 2020, 57(3): 760-772.
- [39] 王文东, 红梅, 赵巴音那木拉, 刘鹏飞, 赵乌英嘎, 马尚飞, 美丽. 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, 2019, 25(6): 1344-1351.
- [40] 林英华, 朱平, 张夫道, 彭畅, 高洪军, 刘淑环. 吉林黑土区不同施肥处理对农田土壤昆虫的影响. 生态学报, 2006, 26(4): 1122-1130.
- [41] 孙涛, 陈强, 张兴义. 东北黑土区耕作措施对地表节肢动物多样性的影响. 昆虫学报, 2014, 57(1): 74-80.
- [42] 战丽莉, 许艳丽, 张兴义, 潘凤娟, 裴希超, 刘振宇. 耕作方式对中小型土壤动物多样性影响. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2371-2377.
- [43] 吴宪, 张婷, 孔云, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 张贵龙, 王丽丽, 修伟明. 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. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3689-3696.

- [44] 杨迪, 林琳, 杨旭, 张雪萍, 沙迪, 高梅香, 张利敏. 黑龙江不同玉米秸秆还田方式下土壤动物群落结构及其对秸秆降解的影响. 生态学报, 2020, 40(1): 356-366.
- [45] 张赛, 王龙昌. 秸秆覆盖对中小型土壤动物动态变化的影响. 农机化研究, 2013, 35(2): 121-125.
- [46] 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 张焕朝, 张丛志. 黄淮海平原小麦保护性耕作对土壤动物总量和多样性的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1766-1772.
- [47] 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. 中国农业科学, 2015, 48(5): 911-920.
- [48] 周育臻. 紫色土区长期秸秆还田与轮作对土壤动物群落的影响[D]. 成都: 西南民族大学, 2020.
- [49] 李红娟. 保护性耕作对大型土壤动物群落特征的影响研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018.
- [50] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [51] Sánchez-Meca J, Marín-Martínez F. Confidence intervals for the overall effect size in random-effects meta-analysis. Psychological Methods, 2008, 13(1): 31-48.
- [52] Zhang T A, Chen H Y H, Ruan H H. Global negative effects of nitrogen deposition on soil microbes. The ISME Journal, 2018, 12(7): 1817-1825.
- [53] Higgins J P J, Thompson S G, Deeks J J, Altman D G. Measuring inconsistency in meta-analyses. BMJ, 2013, 327(7414): 557-560.
- [54] Normand S L T. Tutorial in biostatistics meta-analysis: Formulating, evaluating, combining, and reporting. Statistics in Medicine, 1999, 18(3): 321-359.
- [55] Orwin R G. A fail-safe n for effect size in meta-analysis. Journal of Educational Statistics, 1983, 8(2): 157-159.
- [56] Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. Journal of Statistical Software, 2010, 36(3): 1-48.
- [57] Wu L, Zhang W J, Wei W J, He Z L, Kuzyakov Y, Bol R, Hu R G. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 383-391.
- [58] 张鑫, 李菁园, 孟凡乔, 吴文良, 李洪波, 胡正江. 桓台县冬小麦和夏玉米秸秆长期还田的生态效益分析. 生态学报, 2020, 40(12): 4157-4168.
- [59] 朱新玉, 刘洁, 贺振, 吴东辉. 耕作方式对玉—豆轮作地节肢动物多样性及其营养结构的影响. 生态学报, 2018, 38(20): 7242-7253.
- [60] Zhang S L, Zhang X Y, Huffman T, Liu X B, Yang J Y. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in northeast China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89(3): 427-438.
- [61] Huhta V. The role of soil fauna in ecosystems: a historical review. Pedobiologia, 2007, 50(6): 489-495.
- [62] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 王淑彬, 刘隆旺, 赵其国. 稻田轮作系统的生态学分析. 生态学报, 2006, 26(4): 1159-1164.
- [63] 苗淑杰, 韩晓增, 乔云发, 周连仁. 不同作物对黑土中磷素形态及有效性的影响. 土壤通报, 2009, 40(1): 105-109.
- [64] Wardle D A. Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. Advances in Ecological Research, 1995, 26: 105-185.
- [65] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 蔡立群, 张仁陟, 牛伊宁. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿—作物轮作对土壤物理性质的影响. 草业学报, 2015, 24(7): 12-20.
- [66] 王飞, 李世贵, 徐凤花, 顾金刚. 连作障碍发生机制研究进展. 中国土壤与肥料, 2013, (5): 6-13.
- [67] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 土壤动物多样性及其生态功能. 生态学报, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [68] Johnston J M. The contribution of microarthropods to aboveground food webs: a review and model of belowground transfer in a coniferous forest. The American Midland Naturalist, 2000, 143(1): 226-238.
- [69] de Souza T A F, Rodrigues A F, Marques L F. Long-term effects of alternative and conventional fertilization on macroarthropod community composition: a field study with wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivated on a ferralsol. Organic Agriculture, 2016, 6(4): 323-330.
- [70] de Melo L N, de Souza T A F, Santos D. Cover crop farming system affects macroarthropods community diversity in Regosol of Caatinga, Brazil. Biologia, 2019, 74(12): 1653-1660.
- [71] Chikoski J M, Ferguson S H, Meyer L. Effects of water addition on soil arthropods and soil characteristics in a precipitation-limited environment. Acta Oecologica, 2006, 30(2): 203-211.
- [72] Tyler G. The ground beetle fauna (Coleoptera: Carabidae) of abandoned fields, as related to plant cover, previous management and succession stage. Biodiversity and Conservation, 2008, 17(1): 155-172.
- [73] Harte J, Rawa A, Price V. Effects of manipulated soil microclimate on mesofaunal biomass and diversity. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(3): 313-322.
- [74] 勾影波, 苏永春. 土壤温度和含水量对螨类和弹尾类动物数量的影响. 常熟理工学院学报, 2007, 21(2): 57-62.
- [75] Bray S R, Kitajima K, Mack M C. Temporal dynamics of microbial communities on decomposing leaf litter of 10 plant species in relation to decomposition rate. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 30-37.
- [76] 尹国丽, 李亚娟, 张振粉, 李小龙, 张晓燕, 师尚礼. 不同草田轮作模式土壤养分及细菌群落组成特征. 生态学报, 2020, 40(5): 1542-1550.
- [77] Jiang Y J, Liang Y T, Li C M, Wang F, Sui Y Y, Suvannang N, Zhou J Z, Sun B. Crop rotations alter bacterial and fungal diversity in paddy soils across East Asia. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 250-261.
- [78] 刘静如, 郭可馨, 湛亚, 李晗, 张丽, 游成铭, 徐振锋, 谭波. 亚热带森林凋落叶分解过程土壤节肢动物群落的变化特征. 生态学报, 2021, 41(7): 2770-2782.