



DOI: 10.20103/j.stxb.202312112694

孙建财, 刘任涛, 王真, 田颖. 基于文献计量的放牧对草地土壤动物多样性的影响. 生态学报, 2024, 44(14): 6405-6415.

基于文献计量的放牧对草地土壤动物多样性的影响

孙建财^{1,3,4}, 刘任涛^{2,3,4,*}, 王真^{2,3,4}, 田颖^{1,3,4}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

3 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

4 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要:放牧是草地管理和利用的主要方式,对草地生物多样性及其生态系统结构与功能产生深刻影响。土壤动物作为草地生态系统的重要组成部分,由于其生物生态学特性而使其分布受到放牧干扰的显著影响。然而,放牧如何影响土壤动物多样性尚缺乏系统总结与梳理。通过文献计量分析发现,关于放牧对土壤动物的影响研究论文中,美国发文最多(18.36%),其次是中国(16.39%),新西兰以12.14%的占比位居第三;国内外相关发文量经历了三个阶段:1999—2006年为起步发展阶段,2007—2013年为稳步发展阶段,2014年至今为快速发展阶段,国内外发文量分别在2021、2020年达到最高(15篇、81篇);相关论文的引用率逐年升高,2021年以3813次的引用率达到最高,说明放牧对土壤动物的影响研究引起了越来越多国内外学者的关注和重视。总结发现,放牧对土壤动物分布的影响主要以地上栖居和地下栖居土壤动物为研究对象,既包括直接作用途径,亦包括间接作用途径,而且作用方向取决于放牧强度和放牧方式。综合分析表明,以往的研究多注重于放牧对土壤动物产生的影响,忽视了放牧对土壤动物产生影响的作用途径的深入研究。根据我国草地资源分布特征及放牧对土壤动物的影响研究现状,提出未来我国在此领域研究的重点,为未来草地土壤动物多样性研究提供新思路。

关键词:放牧;土壤动物;草地;多样性;文献计量分析

全球草地面积占陆地面积的40%^[1],孕育了地球上丰富多彩的生物多样性。土壤动物是草地生物多样性及生态系统的重要组成部分,在生态系统物质循环和能量流动方面发挥着重要作用,被称为生态系统工程师^[2]。土壤动物按其在土壤中的栖居层次可以分为地上栖居和地下栖居土壤动物^[3]。地上栖居土壤动物一般体型较大,行动能力强,功能群包含捕食性、植食性、腐食性以及杂食性类群,以地表或植被枝干为主要栖息地。地下栖居土壤动物一般体型较小,肉眼无法直接观察,无行动能力或行动能力弱,功能群主要以腐食性为主,常年栖居在土壤内部,对环境变化敏感。因而,草地土壤动物由于其栖息生境的不同而导致不同的生物生态学特性,对环境变化敏感程度不同,将会对外界干扰产生不同的响应和适应,也被称为生态环境变化的指示者^[4],具有重要的生态功能和研究价值。

据统计,全球1/2的陆地地为放牧场地^[5],到目前为止,放牧仍然是草地管理和利用的主要方式,我国更是畜牧业发展大国,牧区面积占全国草原面积的3/4。然而,放牧对草地生物多样性及其生态系统结构与功能产生深刻影响,既对草地植被产生影响,亦对土壤动物分布产生影响。研究表明,放牧对草地土壤动物的影响大于植被^[6]。原因在于,放牧虽然直接导致植被盖度降低,但同时也减少了植物的光照竞争,植物可以通过

基金项目:宁夏自然科学基金创新群体项目(2023AAC01002);国家自然科学基金项目(32360318);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007);干旱区生态-水文宁夏科技创新团队项目(2021RXTDLX01)

收稿日期:2023-12-11; **网络出版日期:**2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxuli2012@126.com

矮化生长、扩展地下资源储存响应放牧干扰^[7]。然而,放牧对土壤动物的影响是致命的,因为土壤动物每个生命周期阶段栖息地所需条件不同,在放牧条件下土壤动物原有的生境遭到破坏而对土壤动物的生存和繁殖产生致命的影响^[6]。因此,厘清放牧对草地土壤动物的影响对草地生物多样性保护及草地可持续发展具有重要意义。

实际上,放牧对草地土壤动物多样性的影响作用非常复杂。以往的研究证实,放牧对土壤动物既有积极作用^[8],也有消极作用^[9],甚至没有影响^[10],这种影响甚至取决于放牧方式和放牧强度^[11]。但是,目前关于放牧对草地土壤动物多样性的影响缺乏全面的梳理和总结,特别是:(1)国内外关于放牧对草地土壤动物多样性影响的研究情况(发文量、研究机构、研究关键词等)如何?(2)放牧如何影响草地土壤动物多样性及其作用途径是什么?(3)针对我国的研究情况,未来我国放牧对土壤动物影响的研究重点是什么?本文借助于文献计量学分析方法,以草地上栖居和地下栖居土壤动物为研究对象,首先分析放牧对草地土壤动物多样性分布影响的研究成果分布情况,然后总结放牧对土壤动物产生影响的作用途径,最后根据文献计量和综述,提出放牧对草地土壤动物多样性影响的未来研究方向,为我国放牧对草地土壤动物多样性的研究提供新的思路与见解。

1 放牧对土壤动物影响的文献计量分析

1.1 文献计量数据来源

文献计量分析采用美国雷德塞尔大学陈超美教授基于 Java 开发的 Citespace 软件 6.2.R6 版本^[12]。在中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)以“放牧”AND“甲虫”OR“鞘翅目”OR“土壤跳虫”OR“土壤螨类”OR“土壤线虫”OR“蚯蚓”为检索条件,共检索到 109 篇文献。同时在 Web of Science (WOS)核心合集以 topic = “grazing” OR “pasturage” OR “browse” AND “soil fauna” OR “soil arthropods” OR “soil animal” AND “grassland” OR “rangeland”为检索条件,检索时间跨度为 1999 年—2023 年 5 月,共检索到 1013 篇文献(来自 2539 个机构,329 本期刊,包含作者 3939 人)。

1.2 国内发文数量、机构及主要研究作者

国内关于放牧对土壤动物的影响研究论文自 1985 年至 2006 年历经起步发展阶段(图 1),2007 年至 2013 年历经稳步发展阶段,2014 年至今历经快速发展阶段,相关发文量在 2021 年最高(15 篇)。整体上国内关于放牧影响土壤动物分布和多样性的研究较少,特别是放牧如何影响土壤动物多样性及土壤动物在放牧干扰下的适应机制,未来需要加大研究投入和力度。在发文机构方面,东北师范大学、内蒙古农业大学、内蒙古师范大学、兰州大学、中国科学院大学、吉林大学等发文较多,是研究放牧影响土壤动物多样性的主要机构。

1.3 国内研究论文关键词聚类及发展趋势

国内关于放牧对草地土壤动物影响研究关键词年度变化趋势如图 2,每一个节点代表一个关键词,节点越大则关键词出现的频次越大,从左到右展示了关键词从 1994 年至 2023 年的变化趋势。将检索文献以关键词进一步归纳分类得到 8 个聚类标签,从上到下展示了关键词聚类标签(研究主题)。其中,“荒漠草原”聚类主要包括甲虫群落及土壤功能等;“青藏高原”聚类主要包括放牧强度、高寒草甸、典型草原及灌丛化等;“多样性”聚类主要包括青藏高原及群落结构等;“林线”聚类主要包括土壤动物、多样性及高山等;“高寒草地”聚类主要包括土壤线虫、模拟放牧及生态指数等;“草地退化”聚类主要包括土壤跳虫及群落特征等;“种子埋藏”聚类主要包括甲虫、二次传播等;“不同草地利用方式”聚类主要包括家畜放牧、植物群落及放牧管理等。这些聚类结果反映了我国放牧对土壤动物影响的研究论文具有明显的区域特点,主要集中在荒漠草原、高寒草甸、典型草原及一些灌丛化的草原中,并且展示了每个主题研究的热点关键词,为了解国内放牧对土壤动物影响研究的主题与热点提供了基础信息。

1.4 国际发文国家、机构及期刊

关于放牧对土壤动物的影响研究论文中,美国发文最多(18.36%),其次是中国(16.39%),新西兰以

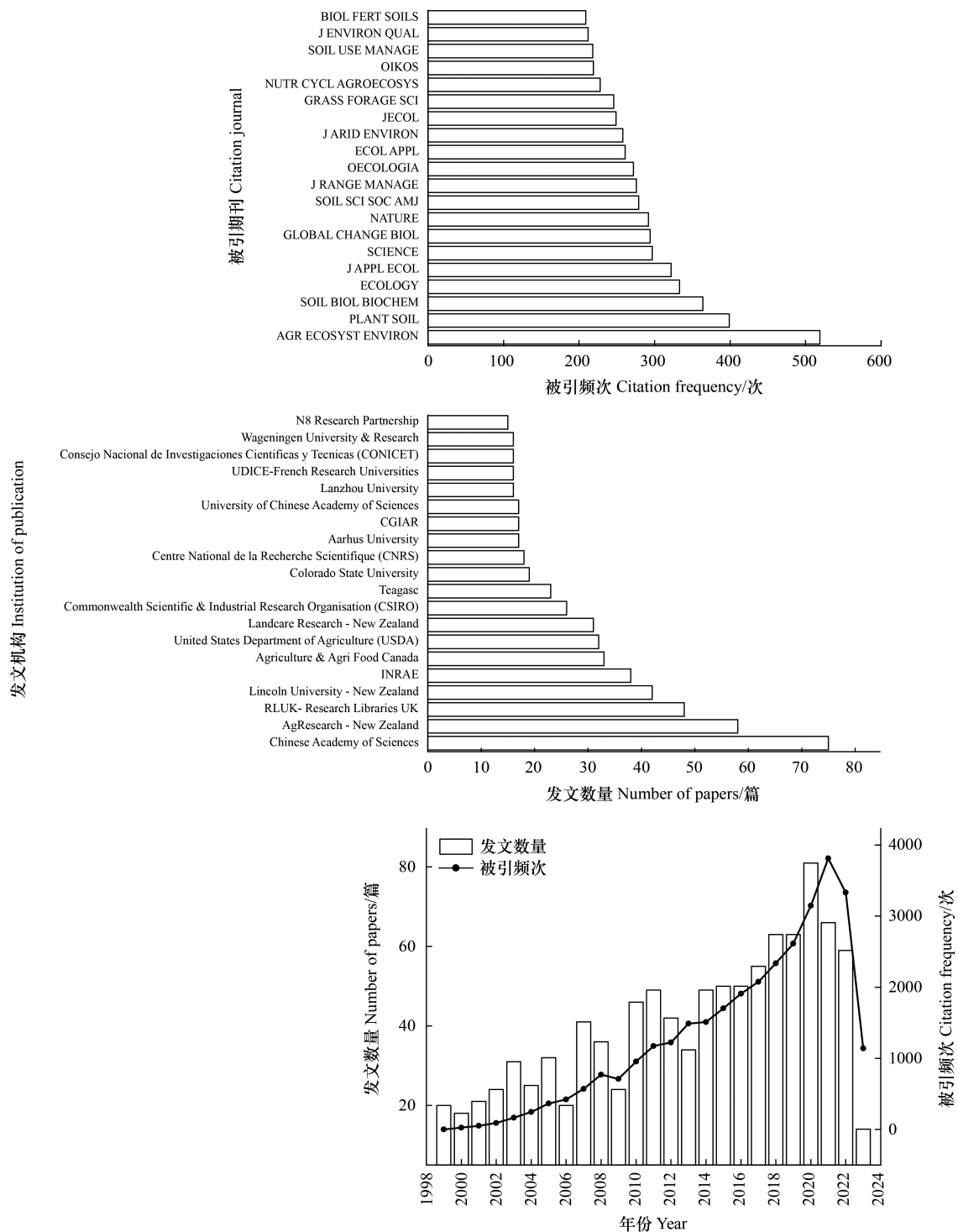


图 4 基于 WOS 的放牧对土壤动物影响研究论文前 20 被引期刊、前 20 发文机构及年度发文数量

Fig.4 Top 20 cited journals, top 20 publishing institutions, and annual publication number of research papers on the effects of grazing on soil fauna based on WOS

土壤动物影响相对较小。此外,由于放牧导致栖息地适宜性下降(如植被盖度下降、土壤紧实度增加等)迫使地上栖居土壤动物寻找新的栖息地,导致局域土壤动物多样性发生变化^[15]。

其次,家畜采食叶片对内食性昆虫的无意摄入直接减少其多样性(路径 2),而对外食性昆虫的影响较小。而植食性昆虫对家畜采食也会做出响应,Gish 等研究发现,蚜虫(Aphidoidea)和瓢虫(Coccinellidae)在植物内

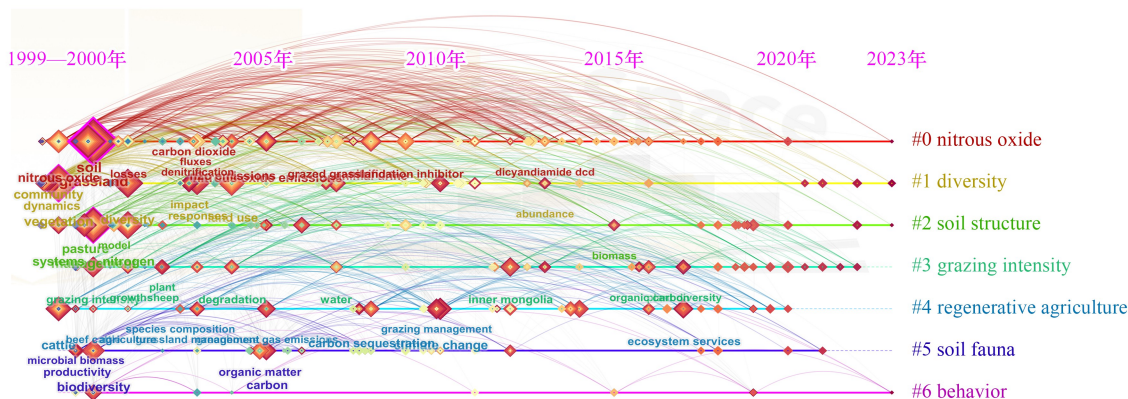


图 5 基于 WOS 的放牧对土壤动物影响研究关键词年度变化趋势及聚类结果

Fig.5 Keywords annual change trend and clustering result of the effects of grazing on soil fauna based on WOS

部感觉到食草动物的呼吸时会通过舍弃植物叶片避免被大型食草动物摄入^[16]。此外,家畜产生的粪便又为土壤动物提供了养分(路径 3),增加了腐食性土壤动物的数量^[17],关于家畜粪便增加土壤动物数量及多样性的研究主要集中在蛭螂^[17–18],但也有文献报道高密度放牧会增加蛭螂被踩踏的风险,从而降低蛭螂数量^[14]。Wagner 等研究了放牧后蛭螂数量的变化,发现在轻度放牧下会增加蛭螂的数量,而长期高强度放牧下这种正向作用会消失,导致土壤动物多样性急剧下降^[19]。

2.2 放牧对地下栖居土壤动物的直接影响

地下栖居土壤动物移动能力弱或无法移动,一般栖居于土壤中,对环境变化的感知非常敏感^[20],家畜踩踏导致地下栖居土壤动物直接死亡(路径 1),进而影响土壤动物多样性^[9]。此外,家畜粪便为地下栖居土壤动物提供食物来源,在局域尺度上可能会增加地下栖居土壤动物的数量(路径 3)。总的来说,家畜对土壤动物群落具有下行效应,能显著改变土壤动物群落组成,而家畜粪便引起腐食性土壤动物增加又存在上行效应,影响更高营养级土壤动物^[6]。

3 放牧对土壤动物的间接影响

尽管放牧对土壤动物的直接影响是多方面的,但与直接作用相比,间接作用对土壤动物的影响更为复杂^[6](图 6)。放牧对土壤动物的间接作用主要通过改变植被状况^[21](路径 4)及土壤条件(路径 13)来实现^[22]。

3.1 放牧对地上栖居土壤动物的间接影响

草地植被不仅为家畜提供了食物资源,而且植被覆盖也造就了丰富多彩的土壤动物世界。对于地上栖居土壤动物来说,植被为其多样化的功能群发展提供了基础条件。首先,放牧最直接的表现是造成草地植被盖度下降,由此影响地上栖居土壤动物的多度和多样性。(1)植被减少导致植食性地上栖居土壤动物可食植物叶片减少(路径 5),降低了植食性土壤动物的多度和多样性^[15];(2)植被为地面土壤动物提供了良好的遮蔽效果(路径 6),降低了鸟类及捕食性脊椎动物捕食土壤动物的风险^[23],而放牧导致植被高度和密度下降,大量土壤动物裸露在地表,增加了土壤动物被捕食的风险^[23];(3)植被对捕食性土壤动物捕食具有隐蔽和设置陷阱的作用(路径 7),例如植被为蛭螂(Mantodea)提供隐蔽和跟踪猎物的机会,植被细高的茎干为蜘蛛(Araneida)结网提供了支撑等,而植被被啃食导致捕食性昆虫无法获得足够食物资源导致其数量减小^[24]。

其次,一些昆虫将卵产在植物叶片上,家畜啃食植物叶片时流出的口水会抑制土壤动物的孵化率^[25](路径 9),影响其多样性。此外,家畜在啃食叶片时掉落的植物碎屑会吸引植食性土壤动物^[8],增加局域土壤动物多样性(路径 12)。同时,家畜皮肤组织掉落在草地,也会吸引土壤动物,引起局域土壤动物增加。

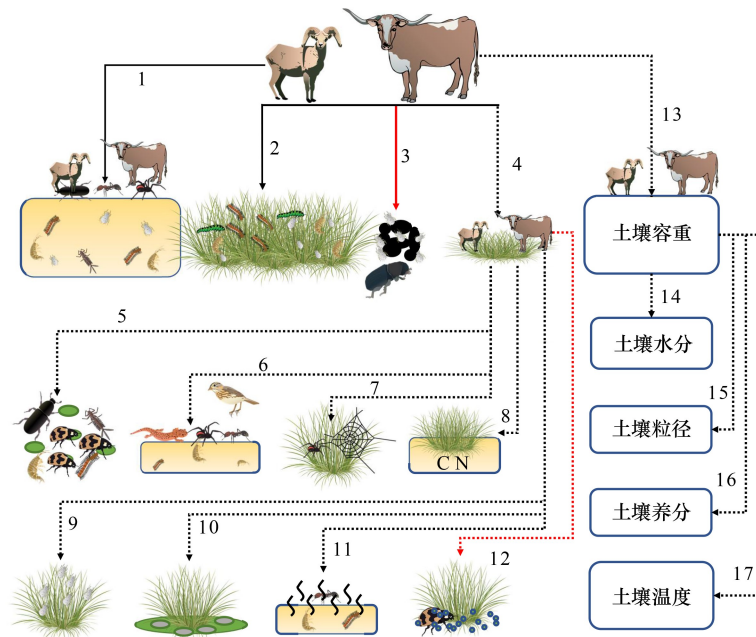


图6 家畜放牧对草地土壤动物的直接及间接影响

Fig.6 The direct and indirect effects of grazing on soil fauna in grassland

图中实线表示直接影响;虚线表示间接影响;黑线表示负向作用;红线表示正向作用;数字表示放牧影响土壤动物的作用路径

3.2 放牧对地下栖居土壤动物的间接影响

对于生活在土壤内部的地下栖居土壤动物来说,植被和土壤的变化都会引起其群落组成的变化。一方面,植被具有光合固碳、根系固氮的能力,为土壤输送必需养分(路径8),由于植被地上部分被啃食,植物固碳、固氮的能力下降^[26],地下栖居土壤动物缺失食物资源,从而影响土壤动物多样性。而且由于植物叶片减少导致植被凋落物减少(路径10),直接降低了植被输入土壤中的元素含量,进而影响地下栖居土壤动物的分布和多样性^[27]。另一方面,高大茂密的植被对土壤温度有缓冲作用^[28],白天温度高,夜晚温度低,而植被能维持相对恒定的土壤温度,为土壤动物提供适宜栖息和产卵场所(路径11),放牧后由于植被被啃食导致遮光能力下降,地表裸露导致土壤温度升高,使移动能力弱、无法寻找适宜栖息地的土壤动物死亡,特别是对土壤动物幼虫发育至关重要^[29]。

放牧除显著降低草地植被盖度外,还会显著改变土壤理化性质^[30—31]。大量研究表明放牧显著增加土壤容重,从而改变土壤含水量与土壤机械组成,进而影响土壤养分的含量与分布^[32]。地下栖居土壤动物常年生活在土壤内部,对土壤的变化非常敏感,家畜踩踏导致土壤容重增加^[32](路径13),土壤疏松度下降,改变了地下栖居土壤动物的生活空间,主要表现为:(1)土壤容重增加导致水分入渗率降低(路径14),土壤持水力下降;(2)土壤容重增加导致土壤沙粒、粉粒、黏粒含量发生变化(路径15),土壤环境变得不适宜生存;(3)土壤疏松度和植被盖度下降导致输入土壤中的养分含量减少(路径16),地下栖居土壤动物缺乏足够的食物资源;(4)植被减少导致土壤温度升高(路径17),土壤环境不再适宜栖息。

3.2.1 放牧对土壤螨类跳虫及土壤线虫的影响

土壤螨类跳虫及土壤线虫是地下栖居土壤动物的主要组成部分。由于不同的土壤动物类群营养结构及生活史策略不同,使得放牧对不同类群产生不同的影响和作用。研究表明,放牧降低了土壤螨类跳虫的多度及多样性^[33],这不仅与放牧导致的植被和土壤条件变化相关,而且与土壤动物营养级结构密切相关^[34]。但也有研究表明放牧增加了土壤螨类跳虫的多样性^[34],这与放牧导致的环境条件变化密切相关。例如,孙彩彩等^[35]在高寒草甸的放牧实验中发现,家畜放牧显著减小土壤螨类及跳虫的多度,但会提高其多样性,其原因

在于放牧改变了土壤容重和土壤速效养分的含量。关于放牧对土壤线虫的研究表明,放牧导致植被和土壤性质的变化降低了土壤线虫的多度及多样性^[36]。然而,Pan 等^[37]通过不同放牧强度对土壤线虫的影响研究发现,轻度放牧使土壤线虫的丰富度增加 18.5%,并且随放牧强度增加,深层土壤能够缓冲高强度放牧对土壤线虫的不利影响^[38]。整体上,研究表明放牧对土壤螨类跳虫及土壤线虫的作用方向取决于放牧方式与放牧强度。例如,羊单牧和轻度放牧会促进土壤螨类跳虫的多样性^[39-40],而牛羊混牧和过度放牧则对土壤动物群落产生负向作用。

面对放牧带来的不利影响,土壤动物会做出响应以应对放牧干扰^[41]。研究表明,当土壤紧实度增大、水分减少时,土壤动物会向更深层土壤中迁移以获得足够的生活元素,而无法移动的、耐受力强的土壤动物在草地短期遭受放牧干扰时可能会存活下来^[3],但在长期放牧干扰及过度放牧下,土壤动物则会死亡。并且土壤动物不同的类群对放牧的响应原因可能不同,土壤螨类和跳虫具有避光避热性^[42],植被减少导致地表土壤温度升高,迫使他们向更深层土壤移动,而土壤线虫对水分尤为敏感,放牧引起的土壤变化迫使它们向更湿润的土层移动以获取足够的水分^[43],不同土壤动物类群对放牧干扰表现出不同的适应方式。

4 不同放牧方式与放牧强度对土壤动物的影响

4.1 放牧方式对土壤动物的影响

牛和羊是牧区最主要的家畜类型,研究表明牛和羊不同的体型,对牧草的不同偏好以及不同的粪便类型导致它们对草地土壤动物产生不同程度的影响^[44]。相比于羊,牛因其高体重、大身躯对草地植被和土壤的破坏程度大于羊^[45],牛蹄踩踏使土壤更加紧实,土壤持水率显著下降^[46],这对地下栖居土壤动物的影响更大^[31]。对于牛等体型较大的食草动物,它们可以忍受较低的植物营养含量,但需要更多的食物量来最大化生产性能^[47],而对于羊来说,它们选择食物更多倾向于植物物种丰富度高的地方^[48]。单位个体的牛摄入量大于羊,但若羊群数量超过牛群,羊群对植被的摄入甚至会超过牛群,进而影响土壤动物的多样性。然而,一项在高寒草原不同放牧方式对土壤动物的影响研究中表明,羊单牧对土壤动物多样性具有正向作用,而牛羊混牧或牛单牧则对土壤动物产生不利影响^[40]。此外,不同的粪便类型也会产生不同的影响,McDowell 等研究了牛、羊、鹿放牧后粪便养分的流失速率,发现在同等放牧强度下,牛粪的硝态氮、氨态氮、和磷的损失大于羊粪和鹿粪^[49]。然而,羊的粪便比牛的粪便分布更加均匀^[50],对土壤元素的补充较为平衡。研究表明,羊单牧与牛羊混牧对土壤有机碳稳定性的影响较小,而牛单牧对土壤有机碳稳定性影响较大^[45],而在草地承载力范围之内,一定数量的家畜放牧对土壤动物的影响较小,甚至没有影响^[10]。

4.2 放牧强度对土壤动物的影响

放牧强度对土壤动物产生的不同影响主要通过通过对植被和土壤的改变发生^[6]。轻度放牧显著提高土壤有机碳和铵态氮^[51],进而增加土壤动物数量。Panayiotou 等研究发现,在轻度放牧下土壤线虫的多度直接增加了 18.5%^[11],因为轻度放牧改变了植被组成,家畜粪便影响了土壤养分的空间分布^[51]。适度放牧下草地植被展现出密度依赖性的驼峰型模式^[52],由于短期内植被增加,导致土壤动物多样性在短期内增加。随着放牧强度增加,草地有机碳、生物量、碳氮比呈下降趋势^[7, 53]。研究表明重度放牧显著增加土壤容重,降低土壤有机碳、硝态氮和土壤水分^[51],在重度放牧下草地植被急剧减少,植被恢复力低,导致植被光合作用减弱,固碳能力下降,进而降低了土壤碳含量。此外,由于重度放牧踩踏使土壤容重增加,土壤水分减少,增加了土壤动物被踩踏致死的风险。Yan 等通过不同强度的放牧试验表明,在高强度放牧下土壤温度直接提高 2.6℃^[30],显著影响土壤动物生存。如果草原长期遭受高强度放牧,会导致土壤动物多样性急剧下降,草原生态系统近乎崩溃^[54]。

5 国内不同牧区放牧对土壤动物的影响

5.1 国内不同牧区草地资源

我国牧区主要包括青海、西藏、甘肃、内蒙古、新疆等省和自治区,不同牧区家畜主要是牛和羊,各个牧区

均存在不同程度的超载放牧情况^[55]。根据第一次草地普查数据,我国草地总面积为 4 亿 hm^2 , 占国土总面积的 41.7%^[56], 其中五大牧区的草地面积占我国草地面积的 71.6% 以上^[57]。其中青海、西藏、甘肃草地类型主要是高寒草甸和高寒草原, 内蒙古主要是温性草原和荒漠草原, 新疆则包含了高寒草甸、高寒草原、温性草原及荒漠草原^[55]。高寒草甸植被类型以耐高海拔和寒冷的矮杆草和禾草为主, 植被盖度大, 而高寒草原植被类型以耐高海拔和寒冷矮杆草和灌木、半灌木为主, 植被分布呈斑块状^[57]。温性草原植被类型以旱生丛生禾草为主, 并混有旱生杂草, 而荒漠草原以旱生灌木、半灌木为主, 并混有少量旱生禾草和杂草^[57]。

5.2 国内不同牧区放牧对土壤动物的影响

不同牧区的海拔、降水、气候等条件不同, 孕育了不同的草地类型, 因此不同牧区放牧对土壤动物产生的影响不同。研究表明, 放牧降低了高寒草甸和草原的地上栖居土壤动物多样性^[35], 但增加了地下栖居土壤动物的多样性^[35, 40], 并且高寒草原在不同放牧强度下对不同土壤动物类群产生的影响不同^[39]。然而, 在温性草原的放牧实验中发现, 放牧导致地下栖居土壤动物多样性降低^[58]。同时, 研究表明轻度放牧对荒漠草原土壤线虫多样性有积极作用^[59], 但也有研究表明放牧对荒漠草原土壤线虫多样性没有影响^[60]。放牧对不同牧区草地类型中土壤动物的差异性影响反映出放牧对土壤动物影响的地域性。不同的草地类型具有不同生态功能的植被群落和土壤条件, 不同草地类型植被及土壤对放牧干扰的差异响应方式导致土壤动物多样性的变化规律不同。例如, 在高寒草原放牧导致植被盖度降低, 但相对丰富的降水和土壤使植被恢复能力强, 而在荒漠草原, 植被盖度降低后由于水分亏缺再生长能力弱^[61], 因此, 不同牧区放牧对土壤动物的影响不同。

6 研究展望

由放牧导致的植被和土壤的变化间接改变草地土壤动物多样性的分布格局, 家畜踩踏和采食摄入则直接改变草地土壤动物分布。草地植被和土壤的变化是一个连续的复杂过程, 放牧条件下将对土壤动物造成不同的影响。我国草地资源丰富, 牧区中高寒草甸、高寒草原、温性草原及荒漠草原占比达 71.6% 以上, 是支撑我国畜牧业发展的主要草地类型。然而, 在高寒草原和荒漠草原中植被类型不是以单一的草本为主, 而是形成了草本植物和灌木嵌套的斑块状景观格局, 草本和灌丛不同的生态功能对土壤动物亦会产生不同影响。本文基于文献计量和综述, 提出我国未来放牧对草地土壤动物多样性的研究重点:

(1) 在全球变化背景下, 应更多关注放牧与全球变化因子(增温、干旱)的交互作用对草地土壤动物的影响, 特别是增温(高寒生态系统)和干旱(荒漠生态系统)条件下草地土壤动物多样性对放牧的响应规律及其内在机制, 是深入分析草地土壤动物多样性在草地生态系统物质循环和能量流动等生态系统功能的重要基础。

(2) 在草本植物和灌木嵌套形成的草地类型中环境异质性高, 放牧条件下草本和灌木对草地土壤动物多样性的差异性影响及多样性维持机制, 关乎草地生态系统的稳定性与可持续发展, 在草地高质量发展新时期需要重点关注。

(3) 放牧作为草地生态系统一种常见的干扰因子, 在不同放牧强度下, 草地土壤动物多样性与生态系统功能的关系及对草地生态系统服务功能的作用, 是草地生态系统服务人类福祉的重要体现, 需要全面考虑。

(4) 不同草地类型生态系统中, 土壤动物对放牧干扰的差异性响应及适应机制, 是了解不同草地类型中土壤动物在放牧干扰下仍然维持其多样性的重要原因, 需要加强投入和研究。

参考文献(References):

- [1] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [2] 傅声雷. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势. 生物多样性, 2007, 15(2): 109-115.
- [3] 刘任涛. 荒漠草原土壤动物与降雨关系研究现状. 生态学杂志, 2012, 31(3): 760-765.
- [4] 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.
- [5] Zeder M A. Domestication and early agriculture in the Mediterranean Basin: Origins, diffusion, and impact. Proceedings of the National Academy of

- Sciences of the United States of America, 2008, 105(33): 11597-11604.
- [6] Van K R, Van D F, Van N C G E T, WallisDeVries M F, Olff H. Effects of large herbivores on grassland arthropod diversity. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2015, 90(2): 347-366.
- [7] Wang Y, Wesche K. Vegetation and soil responses to livestock grazing in Central Asian grasslands: a review of Chinese literature. *Biodiversity and Conservation*, 2016, 25(12): 2401-2420.
- [8] Moran M D. Bison Grazing Increases Arthropod Abundance and Diversity in a Tallgrass Prairie. *Environmental Entomology*, 2014, 43(5): 1174-1184.
- [9] Krüss A, Tschamtké T. Contrasting responses of plant and insect diversity to variation in grazing intensity. *Biological Conservation*, 2002, 106(3): 293-302.
- [10] Spalinger L C, Haynes A G, Schütz M, Risch A C. Impact of wild ungulate grazing on *Orthoptera* abundance and diversity in subalpine grasslands. *Insect Conservation and Diversity*, 2012, 5(6): 444-452.
- [11] Panayiotou E, Dimou M, Monokrousos N. The effects of grazing intensity on soil processes in a Mediterranean protected area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(9): 441.
- [12] Chen C M, Leydesdorff L. Patterns of connections and movements in dual-map overlays: A new method of publication portfolio analysis. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2014, 65(2): 334-351.
- [13] Duffey E. The effects of human trampling on the fauna of grassland litter. *Biological Conservation*, 1975, 7(4): 255-274.
- [14] Negro M, Rolando A, Palestini C. The Impact of Overgrazing on Dung Beetle Diversity in the Italian Maritime Alps. *Environmental Entomology*, 2011, 40(5): 1081-1092.
- [15] Van K R, Schrama M, Nolte S, Bakker J P, WallisDeVries M F, Berg M P. Defoliation and Soil Compaction Jointly Drive Large-Herbivore Grazing Effects on Plants and Soil Arthropods on Clay Soil. *Ecosystems*, 2015, 18(4): 671-685.
- [16] Gish M, Dafni A, Inbar M. Mammalian herbivore breath alerts aphids to flee host plant. *Current Biology*, 2010, 20(15): 628-629.
- [17] Verdú J R, Moreno C E, Sánchez R G, Numa C, Galante E, Halffter G. Grazing promotes dung beetle diversity in the xeric landscape of a Mexican Biosphere Reserve. *Biological Conservation*, 2007, 140(3-4): 308-317.
- [18] Jay R P, Niogret J, Errouissi F, Labarussias M, Paoletti É, Luis M V, Lumaret J P. Relative efficiency of extensive grazing *vs.* wild ungulates management for dung beetle conservation in a heterogeneous landscape from Southern Europe (Scarabaeinae, Aphodiinae, Geotrupinae). *Biological Conservation*, 2008, 141(11): 2879-2887.
- [19] Wagner P M, Abagandura G O, Mamo M, Weissling T, Wingeyer A, Bradshaw J D. Abundance and Diversity of Dung Beetles (Coleoptera: Scarabaeoidea) as Affected by Grazing Management in the Nebraska Sandhills Ecosystem. *Environmental Entomology*, 2021, 50(1): 222-231.
- [20] Kay F R, Sobhy H M, Whitford W G. Soil microarthropods as indicators of exposure to environmental stress in Chihuahuan Desert rangelands. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28(2): 121-128.
- [21] Blaise C, Mazzia C, Bischoff A, Millon A, Ponel P, Blight O. Vegetation increases abundances of ground and canopy arthropods in Mediterranean vineyards. *Scientific Reports*, 2022, 12: 3680.
- [22] Eldridge D J, Soliveres S, Bowker M A, Val J. Grazing dampens the positive effects of shrub encroachment on ecosystem functions in a semi-arid woodland. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(4): 1028-1038.
- [23] Belovsky G E, Slade J B, Stockhoff B A. Susceptibility to Predation for Different Grasshoppers: An Experimental Study. *Ecology*, 1990, 71(2): 624-634.
- [24] Gibson C W D, Hambler C, Brown V K. Changes in Spider (Araneae) Assemblages in Relation to Succession and Grazing Management. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(1): 132.
- [25] Petney T N. Ecological implications of control strategies: Arthropods of domestic and production animals. *International Journal for Parasitology*, 1997, 27(2): 155-165.
- [26] An H, Li G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 341-349.
- [27] Langelotto G A, Denno R F. Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis. *Oecologia*, 2004, 139(1): 1-10.
- [28] Dennis P, Thomas M B, Sotherton N W. Structural Features of Field Boundaries Which Influence the Overwintering Densities of Beneficial Arthropod Predators. *Journal of Applied Ecology*, 1994, 31(2): 361.
- [29] Bourn N A D, Thomas J A. The challenge of conserving grassland insects at the margins of their range in Europe. *Biological Conservation*, 2002, 104(3): 285-292.
- [30] Yan Y C, Yan R R, Chen J Q, Xin X P, Eldridge D J, Shao C L, Wang X, Lv S J, Jin D Y, Chen J, Guo Z J, Chen B R, Xu L J. Grazing modulates soil temperature and moisture in a Eurasian steppe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 157-165.
- [31] Hiltbrunner D, Schulze S, Hagedorn F, Schmidt M W I, Zimmermann S. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. *Geoderma*, 2012, 170: 369-377.

- [32] Eldridge D J, Beecham G, Grace J B. Do shrubs reduce the adverse effects of grazing on soil properties? *Ecohydrology*, 2015, 8(8): 1503-1513.
- [33] 赵巴音那木拉, 兴安, 刘鹏飞, 哈琴, 德海山, 红梅, 美丽. 放牧和刘割对草甸草原中小型土壤动物群落的影响. *中国土壤与肥料*, 2023(3): 218-225.
- [34] 刘继亮, 赵文智, 王永珍, 冯怡琳, 祁进贤, 李永元. 禁牧和放牧对祁连山高寒草原秋季大型和中型土壤节肢动物多样性的影响. *草业学报*, 2023, 32(8): 214-221.
- [35] 孙彩彩, 董全民, 杨晓霞, 冯斌, 时光, 吕卫东. 牦牛和藏羊放牧对青藏高原高寒草甸土壤节肢动物群落的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3127-3134.
- [36] Rafael O, Victory C, Ryan N. Dominant plants mediate effects of grazing on soil nematode traits in a wet meadow grassland. *Applied Soil Ecology*, 2023, 191: 105047.
- [37] Pan F J, Yan R R, Zhao J L, Li L H, Hu Y F, Jiang Y, Shen J, McLaughlin N B, Zhao D, Xin X P. Effects of grazing intensity on soil nematode community structure and function in different soil layers in a meadow steppe. *Plant and Soil*, 2022, 471: 33-46.
- [38] Zhou J, Xiang Y Z, Sheng X J, Wu J P. Effects of grazing on soil nematodes in grasslands: A global meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2023, 60(5): 814-824.
- [39] 武崎, 吴鹏飞, 王群, 文勇立, 高艳美, 张荣芝, 龙伟. 放牧强度对高寒草地不同类群土壤动物的群落结构和多样性的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1826-1834.
- [40] 孙彩彩, 董全民, 刘文昌, 冯斌, 时光, 刘玉祯, 俞畅, 张春平, 张小芳, 李彩弟, 杨增增, 杨晓霞. 放牧方式对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构和多样性的影响. *草业学报*, 2022, 31(2): 62-75.
- [41] Goosey H B, Smith J T, O'Neill K M, Naugle D E. Ground-Dwelling Arthropod Community Response to Livestock Grazing: Implications for Avian Conservation. *Environmental Entomology*, 2019, 48(4): 856-866.
- [42] 薛娟, 魏雪, 何先进, 吴鹏飞. 高寒草甸生态系统蚁丘对小型土壤节肢动物群落的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1613-1624.
- [43] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 陈家宽. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1541-1546.
- [44] Houlbrooke D J, Morton J D, Paton R J, Littlejohn R P. The impact of land-use intensification on soil physical quality and plant yield response in the North Otago Rolling Downlands. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 2006: 165-172.
- [45] Courman F C, McDowell R, Littlejohn R, Condron L. Effects of cattle, sheep and deer grazing on soil physical quality and losses of phosphorus and suspended sediment losses in surface runoff. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1-2): 264-272.
- [46] Houlbrooke D J, Laurenson S. Effect of sheep and cattle treading damage on soil microporosity and soil water holding capacity. *Agricultural Water Management*, 2013, 121: 81-84.
- [47] Olofsson J, Hulme P E, Oksanen L, Suominen O. Importance of large and small mammalian herbivores for the plant community structure in the forest tundra ecotone. *Oikos*, 2004, 106(2): 324-334.
- [48] Wang L, Wang D L, He Z B, Liu G F, Hodgkinson K C. Mechanisms linking plant species richness to foraging of a large herbivore. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(4): 868-875.
- [49] McDowell R W, Muirhead R W, Monaghan R M. Nutrient, Sediment, and Bacterial Losses in Overland Flow from Pasture and Cropping Soils Following Cattle Dung Deposition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(1-2): 93-108.
- [50] Monteath M A, Johnstone P D, Boswell C C. Effects of animals on pasture production. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1977, 20(1): 23-30.
- [51] Lai L M, Kumar S. A global meta-analysis of livestock grazing impacts on soil properties. *Plos one*, 2020, 15(8): e0236638.
- [52] Kelemen A, Tölgyesi C, Valkó O, Deák B, Migléc T, Fekete R, Török P, Balogh N, Tóthmérész B. Density-Dependent Plant-Plant Interactions Triggered by Grazing. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 876.
- [53] Li W L, Liu C L, Wang W Y, Zhou H K, Xue Y T, Xu J, Xue P F, Yan H P. Effects of Different Grazing Disturbances on the Plant Diversity and Ecological Functions of Alpine Grassland Ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 765070.
- [54] 殷秀琴, 仲伟彦. 羊草草地不同放牧强度下土壤动物的研究. *草业学报*, 1997, 6(4): 72-76.
- [55] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. *科学通报*, 2016, 61(2): 139-154.
- [56] 韩国栋. 中国草地资源. *草原与草业*, 2021, 33(4): 2.
- [57] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47-53.
- [58] 刘国华, 沈果, 王振龙, 路纪琪. 放牧对锡林郭勒草原植被生物量和土壤动物群落的影响. *中国草地学报*, 2013, 35(3): 72-76.
- [59] Gao Z W, Han C W, Huang J, Liu Z Y, Zhang L, Zhang G G, Jia M Q, Li X D. Exploring the optimal grazing intensity in desert steppe based on soil nematode community and function. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(14): 2512-2527.
- [60] 王力群. 放牧对荒漠草原土壤线虫群落及其季节变化的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [61] Smith T, Boers N. Global vegetation resilience linked to water availability and variability. *Nature Communications*, 2023, 14: 498.