第 58 卷 第 5 期　　土 壤 学 报　　Vol. 58，No. 5
2021 年 9 月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　Sep.，2021

DOI：10.11766/trxb202012290717

孙新，李琪，姚海凤，刘满强，吴东辉，朱冬，朱永官. 土壤动物与土壤健康[J]. 土壤学报，2021，58（5）：1073–1083.

SUN Xin，LI Qi，YAO Haifeng，LIU Manqiang，WU Donghui，ZHU Dong，ZHU Yongguan. Soil Fauna and Soil Health[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58（5）：1073–1083.

土壤动物与土壤健康*

孙新[1]，李琪[2]，姚海凤[3, 4]，刘满强[5]，吴东辉[3]，朱冬[6]，朱永官[1, 6†]

（1. 中国科学院城市环境研究所，福建厦门 361021；2. 中国科学院沈阳应用生态研究所，沈阳 110016；3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所，长春 130102；4. 中国科学院大学，北京 100049；5. 南京农业大学资源与环境科学学院，南京 210095；6. 中国科学院生态环境研究中心，北京 100085）

摘　要：土壤动物与土壤健康息息相关，土壤动物多样性和功能能够灵敏反映人类活动和气候变化引起的土壤扰动。同时，土壤动物还通过与生物和非生物组分间的相互作用对地上生态系统产生反馈作用。当前土壤动物在土壤健康评价体系中的应用相对较少，主要集中在土壤线虫、节肢动物和蚯蚓等类群，仍缺乏基于土壤动物的系统性评价指标。因此，本文围绕土壤动物在指示土壤健康方面的潜力，系统总结了现有基于土壤动物的土壤健康评价指标，强调未来应建立和完善土壤动物基因组信息数据库，挖掘土壤动物的功能性状，加强土壤食物网结构和生态功能的研究，建立集成土壤动物物种多样性、功能性状和土壤食物网的指标体系，从而促进土壤健康和生态系统的可持续发展。

关键词：土壤健康；土壤动物；功能性状；土壤食物网

中图分类号：S154.5　　**文献标志码：**A

Soil Fauna and Soil Health

SUN Xin[1], LI Qi[2], YAO Haifeng[3, 4], LIU Manqiang[5], WU Donghui[3], ZHU Dong[6], ZHU Yongguan[1, 6†]

(1. *Institute of Urban Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen*, *Fujian* 361021, *China*; 2. *Institute of Applied Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*; 3. *Northeast Institute of Geography and Agroecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130102, *China*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; 5. *College of Resources and Environmental Sciences*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*; 6. *Research Center for Eco-Environmental Sciences*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100085, *China*)

Abstract: Soil fauna play important roles in the maintenance of soil health. Soil biodiversity can sensitively reflect soil disturbances caused by human activities and climate change, and can also influence the above-ground ecosystem through interactions with other below-ground components. Inadequate knowledge on the taxonomy of soil animals as well as the complexity of soil food web greatly limit the research on the linkage between soil fauna and soil health. Thus, we review the recent advances in soil fauna as indicators of soil health, highlight the significance of soil fauna and soil food webs in the maintenance of healthy soil, and propose ways to improve the genome and functional traits database. Soil health assessment that integrates the diversity of soil fauna, functional traits, and soil food web structure is thought to be the most promising, and will

---

* 国家自然科学基金项目（42021005）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 42021005）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：ygzhu@iue.ac.cn

作者简介：孙新（1986—），女，山东聊城人，博士，研究员，长期从事土壤动物多样性研究。E-mail：xsun@iue.ac.cn

收稿日期：2020–12–29；收到修改稿日期：2021–02–09；网络首发日期（www.cnki.net）：2021–03–24

promote soil health and sustainable development of the ecosystem.

Key words: Soil health; Soil fauna; Functional traits; Soil food web

土壤作为地球关键带的核心组成部分，其健康与大气、水环境质量密切相关，决定着植物、动物和人类的健康，同时也是保障农业可持续发展和支撑美丽中国的重要基础[1-2]。随着人口增长、气候变化、不合理的土地利用及环境污染等问题的加剧，土壤生态系统正面临着严峻的考验[3-4]，提升土壤质量和维持土壤健康成为我国土壤科学研究关注的焦点和前沿[5]。

土壤健康是指土壤履行生态系统服务功能的持续能力[6-7]，更加注重土壤质量随时间和管理而变化的动态特性，因此，需要通过一系列动态指标来评估土壤健康状况[8-9]。相比土壤理化特性，土壤生物学特性对环境条件的变化更敏感，目前常用的生物学指标主要包括土壤微生物生物量及活性、碳氮矿化速率、土壤呼吸作用和土壤生物网络复杂度等[9-10]，而对土壤动物相关指标涉及的较少[11]。土壤动物作为土壤生物多样性的重要组分，其种类丰富且高度多样化，具有广泛的生活史策略和摄食类型[12]，在生态系统功能、植物群落动态乃至人类健康中均发挥着至关重要的作用[13-15]。随着 2020 年全球土壤生物多样性现状报告的出版[16]，全球土壤动物学家联手相继在 *Nature* 和 *Science* 等刊物上报道了不同土壤动物类群（如线虫、蚯蚓和原生动物）在全球尺度上的分布及它们在土壤生态系统中的贡献[17-19]，进一步突显了全球变化背景下土壤动物多样性及其生态功能在生态系统中的重要性。

土壤动物几乎参与了所有重要的土壤生态过程，它们在有机质分解、养分循环和维持土壤结构和稳定等方面发挥重要作用[16]。土壤动物群落组成和多样性与土壤的物理、化学及微生物特性的变化密切相关[20-21]，是土壤健康变化的良好指示生物[22]。本文详细综述了土壤动物在土壤健康指示和评价体系中的潜力，尤其是土壤动物功能性状和土壤食物网指标的应用前景，以期能够推动土壤动物和土壤食物网在土壤健康评价和调控中的应用，促进土壤健康和生态系统可持续发展。

1 土壤动物对土壤健康的指示作用

土壤动物的种类繁多、数量庞大，在以往的生态学研究中常根据体宽将土壤动物划分为小型土壤动物、中型土壤动物、大型土壤动物和巨型土壤动物[23]。小型土壤动物如原生动物和线虫等可通过捕食等作用改变土壤微生物群落的组成进而影响分解过程和生物地球化学循环[24-27]。例如原生动物通过取食细菌或真菌可以改变土壤微生物的群落结构，控制病原微生物群落，影响土壤有机质分解，从而影响养分周转及植物生长[17]。跳虫和螨类是中型土壤动物中的典型代表[28-29]，它们通过直接取食土壤微生物来调节其群落结构，同时还可取食凋落物并对凋落物进行破碎，增大微生物与凋落物表面的接触面积，间接促进凋落物的分解和养分循环[30-31]。蚯蚓和白蚁是常见的大型土壤动物类群，它们可通过穿梭、掘穴等非取食活动改变土壤结构，产生的生物孔隙可以增加土壤透气性，影响土壤有机质分布及腐殖质的形成[32-33]；同时，它们在取食土壤及凋落物的过程中还可摄入土壤微生物及其他小型土壤动物，进而间接影响土壤的养分循环过程[34]。蜘蛛、甲虫等捕食性土壤动物也会通过捕食环境中一些中小型土壤动物来影响它们的群落组成[35]。此外，一些巨型土壤动物如鼹鼠等的觅食和筑巢行为也会影响土壤理化性质及其他土壤生物群落组成[16]。

土壤动物的生命活动高度依赖于其所处的环境[36]。由于人类活动和环境变化等因素引起的土壤物理、化学或生物学特性的改变，能够直接导致土壤动物群落的变化（如物种组成、群落结构和个体数量等）[29]。因此，关注土壤动物对环境变化的响应有助于全面挖掘土壤动物类群对土壤健康的指示作用。目前土壤动物在土壤健康和质量的评价中应用较多的类群包括线虫、螨类、跳虫和蚯蚓等，它们对土壤环境的变化敏感且不同类群对于环境变化的响应程度不同[28，37-39]。

在农业生态系统中，土壤健康的干扰因素主要是农药和化肥的使用、耕作和管理方式以及土壤污染等[11，40]。近年来，在全球变化背景下农业土地集约化导致的频繁耕作、农药和肥料的过量使用降低了土壤动物多样性及丰度（abundance）[13，41]，进而威胁土壤健康状况以及生态系统服务[42]。相比传统耕作，有机耕作和保护性耕作下土壤动物的多样性

和密度均有所提高[43-45]，能够显著提高土壤肥力从而促进土壤健康[46]。有研究表明，生物污泥的使用在增加土壤养分的同时也升高了土壤重金属的浓度，从而使土壤跳虫个体数量减少和食细菌线虫个体数量增加[47]。在自然生态系统中，土壤动物与土壤健康之间的关系也得到了广泛关注。土壤动物作为草地生态系统的重要组成部分，常用于监测草地退化及放牧管理对土壤质量的影响[48-49]。研究发现不同放牧强度会影响土壤动物多样性，随着放牧强度的增加，土壤中线虫和跳虫的密度也随之降低[50-51]；而燃烧因减少了输入土壤中的有机质对草地土壤动物群落产生了消极影响[52]。在森林生态系统中，森林砍伐和生态系统向耕地的转化会降低植物的生物量并导致土壤特性和土壤生物多样性的变化[53-54]。如森林砍伐增加了土壤线虫群落中食细菌线虫与食真菌线虫的比例，且短期内难以得到恢复[40，54]；在亚马逊森林砍伐并建立牧场之后，单一的蚯蚓物种迅速繁殖，抑制了其他蚯蚓物种的生存[53]。因此，土壤动物多样性可指示环境变化下的土壤健康状况。

2　基于土壤动物的土壤健康评价

近年来，基于土壤动物开展土壤健康评价开始得到重视[21]，目前主要集中在线虫、节肢动物和蚯蚓等类群（图 1）。

土壤线虫结构简单、数量多、分布广，世代周期较短且易于分离鉴定，在土壤食物网中占据多个营养级[55]，被认为是土壤健康的良好指示生物[22，56-57]。目前基于土壤线虫的物种多样性、生活史特征及取食类型，研究人员提出了一系列相对成熟的土壤健康评价指标，其中物种多样性指标主要包括土壤线虫的物种组成、多度、生物量及均匀度等[40，58]。荷兰学者 Tom Bongers[59]根据线虫不同的生活史对策将其划分为由 *r*-对策者向 *K*-对策者过渡的 5 个 c-p（colonizer-persister）类群，并提出了可反映线虫群落演替状态的成熟度指数（maturity index，MI）。成熟度指数可以表征土壤生态系统稳定性及其受干扰程度，通常越稳定的土壤环境中成熟度指数越高[40]。在此基础上，Ferris 等[60]2001 年根据线虫不同取食类型和生活史特征将线虫进一步划分为不同的功能团，并提出了基于不同功能团的富集指数（enrichment index，EI）、结构指数（structure index，SI）和通路指数（channel index，CI）。其中富集指数和结构指数分别用于评估土壤食物网对可利用资源的响应及食物网的结构变化[61]，而通路指数一般指示有机物的分解途径（如细菌通道或真菌通道）[62]。在土壤健康评价体系中，可根据实际生态系统类型及研究目的选择相应的线虫生态指数。

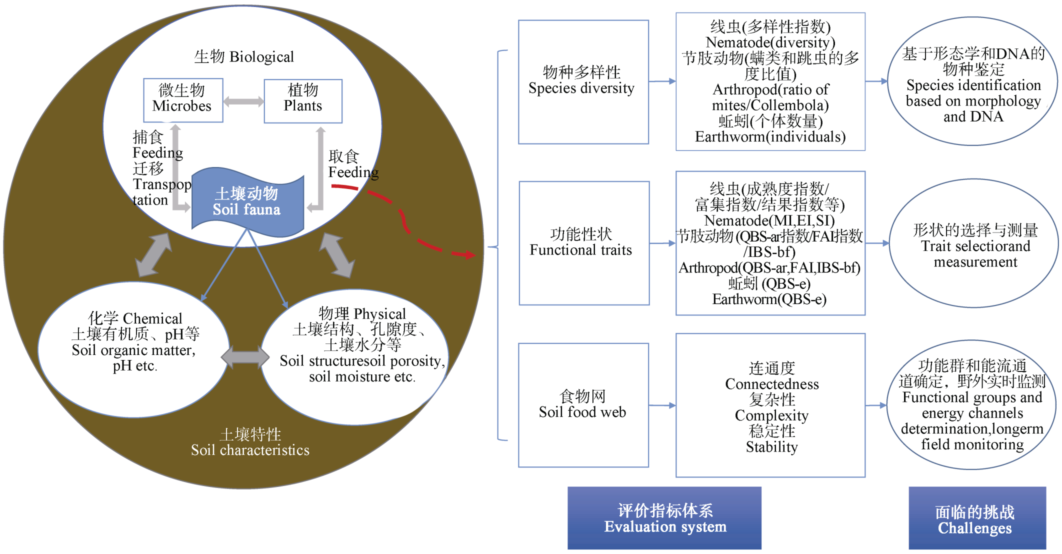

图　1　基于土壤动物的健康评价体系

Fig. 1　Soil health assessment based on soil fauna

土壤节肢动物占所描述的土壤生物的大部分[37]，对土壤环境的变化响应迅速，在土壤健康指示研究中也受到日益关注[63-64]。但由于该类群种类繁多而形态分类知识相对缺乏，直接对其多样性的量化存

在一定困难[64]。基于“在高质量土壤中，形态上能适应土壤环境的节肢动物类群数量更高”这一概念，反映土壤节肢动物群落多样性及脆弱性的 QBS-ar（Soil Biological Quality-arthropod）指数被提出[63-64]。QBS-ar 指数根据土壤样本中节肢动物的形态类型进行生态形态评分（EMI：Eco-morphological Index）并求和[63-65]，常被用于评估土地利用及管理、重金属污染等干扰因素对土壤健康的影响[66]。QBS-ar 指数关注的是节肢动物适应土壤环境的形态特征，因此不需要在物种水平上的分类鉴定[64]。但是，QBS 指数的应用需依赖于土壤节肢动物的存在，并同时认为具有相同EMI值的节肢动物对土壤功能的影响相同，从而忽略了群落丰度差异对土壤功能的影响[10，63]。为了克服这种局限性，Yan 等基于丰度提出了 FAI 指数（Abundance-based Fauna Index）[63]。相比 QBS 指数，FAI 指数可以同时通过土壤动物群落和功能性状特征来衡量土壤保持生物多样性和实现土壤功能的能力，从而监测土壤健康[63]。为了可以更加灵活地选取土壤动物类群，基于节肢动物、腹足纲及寡毛纲类群提出了 IBS-bf 指数（Soil Biodiversity Index-biodiversity friend）[66]。此外，螨类和跳虫丰度的比值也能很好地反映土壤退化程度，可作为衡量土壤健康状况的指标[65]。

蚯蚓作为“生态系统工程师”，其多样性和分布与土壤的健康状况密切相关[6]。它们对土壤环境的改变十分敏感，一旦环境压力过大，蚯蚓就会出现迁移或死亡，因此蚯蚓在土壤中存在与否及其数量多少常被直接作为土壤健康的生物指标[67]。以 QBS-ar 指数为模型，研究者相继提出了基于蚯蚓的土壤质量生物监测指标（QBS-e：Soil Biological Quality-earthworm）[64]，该指标的运用不需要具备大量的分类学专业知识，因此可由农民或土地经营人员开展自主监测[68]。

3 土壤动物功能性状与土壤健康

生态系统多功能性是土壤健康评价的重要内容，土壤动物的功能性状是土壤动物对于周围环境的响应和适应性的直观表现[69]，在表征土壤动物群落、量化食物网结构及其对生态系统功能贡献方面具有很大的潜力[14，70-71]。以跳虫为例，体型大小与资源可用性、代谢强度以及营养生态位有关[72]，食性与物种的生长繁殖及生存能力有关[73]，弹器的发达程度与运动和扩散能力有关，体表色素沉着和眼睛的存在与否与居住环境偏好有关[74]，垂直分布状况与耐旱性有关（表土生的物种有良好的耐旱性，而真土生的物种易受干旱影响）[75]，生殖方式与环境适应性有关[73，76]，等等。因此，土壤动物群落功能性状的组成和多样性会对土壤肥力、污染程度的变化做出响应[77]；同时基于功能性状的指数较基于物种多样性的指数更能精确地反映土壤的健康状况[41，78]。在土壤健康评价体系中，受土壤动物物种本身以及功能性状认知程度的限制，基于土壤动物功能性状的相关指标尚未在土壤健康评价体系中得到有效推动。

土壤动物肠道内具有丰富的微生物类群，被认为是一个天然可移动的微生物存储库[79-80]。这些在土壤动物体内定殖的微生物类群在宿主长期进化、个体发育和环境适应等过程中发挥着重要的作用[81-84]，反映了宿主在土壤环境中的生态功能[85]，因此它们的群落组成和功能是表征土壤动物环境适应性的较好的功能性状。土壤动物肠道微生物与土壤动物一起，共同参与土壤凋落物的分解、养分循环、污染物的降解和迁移过程[80，86-87]。例如，蚯蚓肠道中的营养丰富，有利于厌氧菌的定殖，从而将宿主肠道与其邻近的陆地环境相关联，这些肠道细菌在营养元素和污染物转化中（例如硝化作用和重金属解毒作用等）发挥着重要作用[88]。有研究表明鼠妇肠道微生物可为宿主提供消化陆地食物所必须的酶，从而促进宿主在陆地环境中的生存定殖[89]。有学者也发现土壤中抗生素的暴露增加了土壤动物肠道微生物组中抗生素的抗性基因丰度，抗性基因会在土壤食物链中进行传递，同时也可能通过土壤动物的活动扩散到土壤的其他区域[86，90]。此外，（微）塑料污染和重金属污染也可显著改变土壤动物的肠道微生物组，同时也会对宿主本身的生长繁殖产生一定的负面影响[91-93]。土壤动物肠道微生物组能够同时反映土壤动物本身和其所处环境中的土壤健康状况，且高通量测序技术的突破和生物信息学的发展进一步推动了肠道微生物组群落组成和功能信息的获取。因此，肠道微生物组在土壤健康评价中具有很大的潜力。

4 土壤食物网与土壤健康

不同大小的土壤动物在土壤中以不同的方式发

挥各自的生态功能，但土壤动物之间、土壤动物与微生物及植物之间存在复杂的相互作用，它们通过取食和被取食关系构成了土壤食物网，从而维系着生态系统的结构和功能（图 2）。土壤食物网的特征可用来评价土壤质量和土壤生态系统服务功能，其连通度、复杂性和稳定性主要通过监测食物网中功能类群的组成和生物量、能流通道等参数的变化来实现[42]。根据基础资源（basal resource）的不同，土壤食物网主要分为碎屑食物网和根际食物网[94-95]，其中碎屑食物网基于能流通道又可进一步分为细菌能流通道（以细菌和取食细菌的土壤动物为主）[96]和真菌能流通道（以真菌和取食真菌土壤动物为主）[97]。根际食物网以植物根系及植食性土壤动物为主，其能量通道为根际能流通道[96-97]。不同食物来源的能量通过不同的能流通道在土壤食物网各营养级间传递，从而维持土壤食物网的稳定和土壤环境的健康[98]。

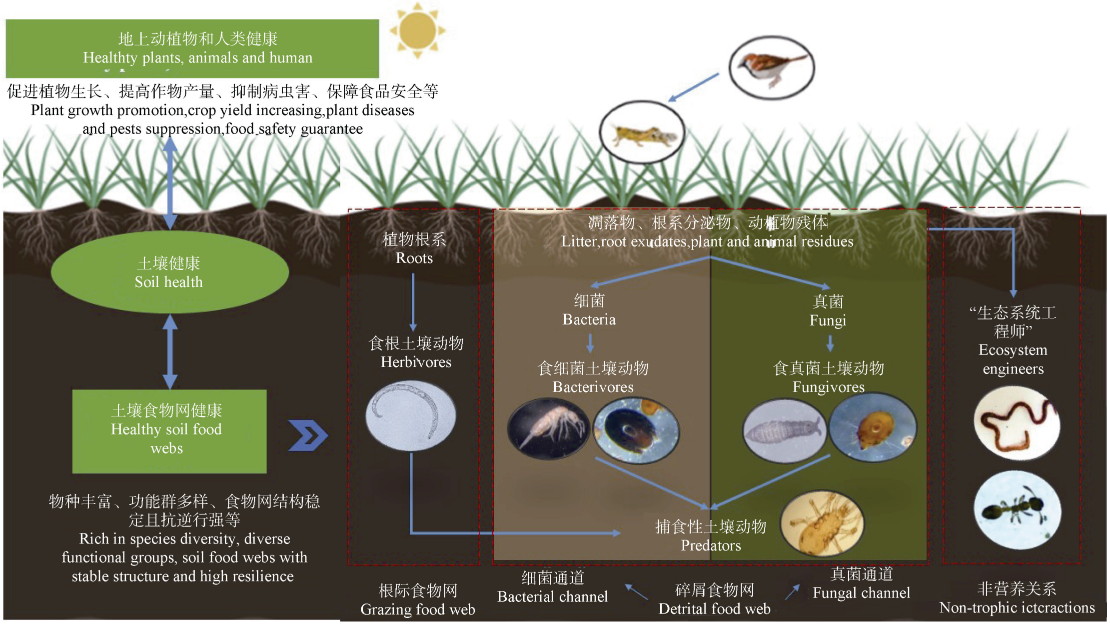

图 2　土壤食物网与土壤健康

Fig. 2　Soil food web and soil health

土地利用方式和强度、农业耕作措施、农田退耕修复等人类活动可引起土壤环境的变化，从而直接影响并改变土壤食物网的组成、结构和能流通道等[42, 99-101]。随着土地利用强度的增加，土壤生物多样性显著降低，从而改变了土壤食物网中各组分的生物量和能流通道[42, 102]。保护性耕作如免耕措施等可降低土壤有机质的分解速度并增加养分的固定，使土壤食物网以真菌能流通道为主[103]。此外，随着农田退耕修复年限的增加，食物网中的基础资源、低营养级的生物量以及各能流通道均显著上升。因此，土壤食物网的特征能够反映土壤环境的改变，并用于指示土壤的健康状况。

土壤动物可通过捕食或非捕食作用改变土壤食物网中的其他生物组分的群落结构，进而影响植物生长和土壤健康。例如，原生动物和线虫能够通过捕食作用影响丛枝菌根真菌的群落组成和生物量从而影响植物生长[104]，还可通过对微生物的捕食作用调节凋落物的分解速率进而影响整个碳循环过程[105]；而蚯蚓等大型土壤动物还可通过非捕食作用如改变土壤的物理结构或竞争食物资源等改变中小型土壤动物的群落结构，从而影响土壤食物网的结构和功能[106]。同时，土壤动物可直接（如取食等）或间接（如分泌代谢产物、协助扩散等）地改变土壤病原菌的群落和功能，进而控制土传病害的发生[107-108]。此外，土壤动物与地上植食动物之间也存在复杂的联系，如原生动物的存在能够增加植物的生物量和繁殖率并提高植物对害虫的耐受性[109]。因此，土壤食物网结构和生态功能的研究对提高土壤肥力、促进植物生长和保持土壤健康具有重要的应用价值。

5　展　望

人类活动正加速全球生物多样性的变化，并导致

生态系统服务功能受到严重威胁[16]。土壤承载了大部分的陆地生物多样性，但相比于地上生物多样性，对于土壤生物多样性的评估和保护仍十分有限[110]。随着土壤健康相关问题的提出，土壤动物多样性因其在土壤健康的指示和调节中发挥的重要作用受到日益关注[20, 111]。然而，由于种类繁多、食性复杂，土壤动物在土壤健康评价体系中的应用进展较慢，目前可用的评价指标也十分有限，未来应着重挖掘基于土壤动物的土壤健康评价指标，通过不同管理措施调控土壤动物及其构成的土壤食物网，提升土壤质量和生态系统功能。未来需重点关注以下几个方面：

1）建立和完善我国土壤动物形态和基因组信息数据库。土壤动物多样性是土壤健康最直观的评价指标之一，但由于当前从事土壤动物形态学分类的研究人员较少，因此土壤动物的物种信息仍十分匮乏。得益于分子生物学技术的发展，基因测序成本大大降低，在大尺度上土壤动物多样性的研究也取得了重要的进展[17-19]。但受土壤动物基因组数据库不全的限制，该技术在土壤动物中的应用还没有得到有效的推动[112]。未来应重视土壤动物分类学和分子生物学技术的结合，建立和完善我国土壤动物形态和基因组信息数据库，从而更好地推动我国土壤动物多样性的研究。

2）深入挖掘基于土壤动物功能性状的土壤健康评价指标。今后应在土壤动物微生物组、取食特性等方面深入挖掘更多具有生态功能表征能力的功能性状，解析土壤动物群落与生态系统功能之间的关联，以期更全面地获取基于功能性状的土壤健康评价指标。

3）建立基于土壤食物网不同功能类群的综合评价指标体系。由于土壤动物食性复杂且随环境变化而改变，加上相关研究手段的限制[112-113]，土壤动物在土壤食物网中的位置和生态功能仍未得到一致的结论。未来在土壤健康评价中，应综合利用多种研究方法，如脂肪酸分析法、稳定同位素技术和DNA 分子技术等，进一步明确土壤动物与其他土壤生物之间的营养关系，量化土壤动物在物质循环与能量流动过程中的贡献，建立基于土壤食物网不同功能类群的综合指标体系。

4）对土壤食物网结构和功能的调控途径研究。土壤食物网是一个动态的网络，组成食物网的各功能群可通过上行效应、下行效应和营养级联效应对食物网的结构和功能进行调控[114-116]，因此未来可通过适当的管理措施来调节土壤动物关键类群，从而调控土壤食物网的结构和生态功能，使土壤环境达到健康、稳定的状态，促进生态系统的可持续发展。

参考文献（References）

[1] Zhu Y G，Li G，Zhang G L，et al. Soil security：From Earth’s critical zone to ecosystem services[J]. Acta Geographica Sinica，2015，70（12）：1859—1869. [朱永官，李刚，张甘霖，等. 土壤安全：从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报，2015，70（12）：1859—1869.]

[2] Zhang J L，Zhang J Z，Shen J B，et al. Soil health and agriculture green development：Opportunities and challenges[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57（4）：783—796. [张俊伶，张江周，申建波，等. 土壤健康与农业绿色发展：机遇与对策[J]. 土壤学报，2020，57（4）：783—796.]

[3] Ohno T，Hettiarachchi G M. Soil chemistry and the one health initiative：Introduction to the special section[J]. Journal of Environmental Quality，2018，47（6）：1305—1309.

[4] Okolo C C，Dippold M A，Gebresamuel G，et al. Assessing the sustainability of land use management of northern Ethiopian drylands by various indicators for soil health[J]. Ecological Indicators，2020，112：106092.

[5] Shen R F，Yan X Y，Zhang G L，et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57（5）：1051—1059. [沈仁芳，颜晓元，张甘霖，等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报，2020，57（5）：1051—1059.]

[6] Bünemann E K，Bongiorno G，Bai Z G，et al. Soil quality - A critical review[J]. Soil Biology & Biochemistry，2018，120：105—125.

[7] Moebius-Clune B N. Comprehensive assessment of soil health：The Cornell framework manual[M]. Ithaca，New York：Cornell University，2016.

[8] Doran J W，Zeiss M R. Soil health and sustainability：Managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology，2000，15（1）：3—11.

[9] Zhu Y G，Peng J J，Wei Z，et al. Linking the soil microbiome to soil health（in Chinese）[J]. Scientia Sinica Vitae，2021，50：1—11. [朱永官，彭静静，韦中，等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学：生命科学，2021，50：1—11]

[10] Paz-Ferreiro J，Fu S L. Biological indices for soil quality evaluation：Perspectives and limitations[J]. Land Degradation & Development，2016，27（1）：14—25.

[11] Liang W J，Dong Y H，Li Y B，et al. Biological characterization and regulation of soil health[J]. Chinese

Journal of Applied Ecology，2021，32（2）：1—10. [梁文举，董元华，李英滨，等. 土壤健康的生物学表征与调控[J]. 应用生态学报，2021，32（2）：1—10.]

［12］ Shao Y H，Zhang W X，Liu S J，et al. Diversity and function of soil fauna[J]. Acta Ecologica Sinica，2015，35（20）：6614—6625. [邵元虎，张卫信，刘胜杰，等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. 生态学报，2015，35（20）：6614—6625.]

［13］ Bardgett R D，van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. Nature，2014，515（7528）：505—511.

［14］ Nielsen U N. Soil fauna assemblages[M]. Cambridge：Cambridge University Press，2019.

［15］ Bakker M R，Brunner I，Ashwood F，et al. Belowground biodiversity relates positively to ecosystem services of European forests[J]. Frontiers in Forests and Global Change，2019，2：6.

［16］ FAO，ITPS，GSBI，SCBD，et al. State of knowledge of soil biodiversity - Status，challenges and potentialities[M]. Rome：FAO，2020.

［17］ Oliverio A M，Geisen S，Delgado-Baquerizo M，et al. The global-scale distributions of soil protists and their contributions to belowground systems[J]. Science Advances，2020，6（4）：eaax8787.

［18］ Phillips H R P，Guerra C A，Bartz M L C，et al. Global distribution of earthworm diversity[J]. Science，2019，366（6464）：480—485.

［19］ van den Hoogen J，Geisen S，Routh D，et al. Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale[J]. Nature，2019，572（7768）：194—198.

［20］ Lehman R M，Cambardella C A，Stott D E，et al. Understanding and enhancing soil biological health：The solution for reversing soil degradation[J]. Sustainability，2015，7（1）：988—1027.

［21］ Cardoso E J B N，Vasconcellos R L F，Bini D，et al. Soil health：Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?[J]. Scientia Agricola，2013，70（4）：274—289.

［22］ Liang W J，Ge T K，Duan Y X. Bioindication of soil fauna to soil health[J]. Journal of Shenyang Agricultural University，2001，32（1）：70—72. [梁文举，葛亭魁，段玉玺. 土壤健康及土壤动物生物指示的研究与应用[J]. 沈阳农业大学学报，2001，32（1）：70—72.]

［23］ Neher D A，Barbercheck M E. Soil microarthropods and soil health：Intersection of decomposition and pest suppression in agroecosystems[J]. Insects，2019，10（12）：414.

［24］ Bardgett R D，Bowman W D，Kaufmann R，et al. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution，2005，20（11）：634—641.

［25］ Hättenschwiler S，Gasser P. Soil animals alter plant litter diversity effects on decomposition[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2005，102（5）：1519—1524.

［26］ Geisen S. The bacterial-fungal energy channel concept challenged by enormous functional versatility of soil protists[J]. Soil Biology & Biochemistry，2016，102：22—25.

［27］ Seppey C V W，Singer D，Dumack K，et al. Distribution patterns of soil microbial eukaryotes suggests widespread algivory by phagotrophic protists as an alternative pathway for nutrient cycling[J]. Soil Biology & Biochemistry，2017，112：68—76.

［28］ George P B L，Keith A M，Creer S，et al. Evaluation of mesofauna communities as soil quality indicators in a national-level monitoring programme[J]. Soil Biology & Biochemistry，2017，115：537—546.

［29］ Menta C，Remelli S. Soil health and arthropods：From complex system to worthwhile investigation[J]. Insects，2020，11（1）：54.

［30］ Frouz J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization[J]. Geoderma，2018，332：161—172.

［31］ David J F. The role of litter-feeding macroarthropods in decomposition processes：A reappraisal of common views[J]. Soil Biology & Biochemistry，2014，76：109—118.

［32］ Frouz J，Jílková V，Cajthaml T，et al. Soil biota in post-mining sites along a climatic gradient in the USA：Simple communities in shortgrass prairie recover faster than complex communities in tallgrass prairie and forest[J]. Soil Biology & Biochemistry，2013，67：212—225.

［33］ Frouz J，Livečková M，Albrechtová J，et al. Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites[J]. Forest Ecology and Management，2013，309：87—95.

［34］ Groffman P M，Fahey T J，Fisk M C，et al. Earthworms increase soil microbial biomass carrying capacity and nitrogen retention in northern hardwood forests[J]. Soil Biology & Biochemistry，2015，87：51—58.

［35］ Lawrence K L，Wise D H. Spider predation on forest-floor Collembola and evidence for indirect effects on decomposition[J]. Pedobiologia，2000，44（1）：33—39.

［36］ Parisi V，Menta C，Gardi C，et al. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity：A new approach in Italy[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2005，105（1/2）：323—333.

［37］ Lakshmi G，Joseph A. Soil microarthropods as indicators of soil quality of tropical home gardens in a village in Kerala，India[J]. Agroforestry Systems，2017，91（3）：439—450.

[38] Liu M P，Yu X S，Ping L F，et al. Community structure of mites in PAH-contaminated field soils in eastern China[J]. Ecology and Environmental Sciences，2013，22（4）：675—684. [刘漫萍，于雄胜，平立凤，等. 华东多环芳烃污染农田土壤螨群落结构研究[J]. 生态环境学报，2013，22（4）：675—684.]

[39] Li J，Ke X，Li Z，et al. Relationship between community structure of soil Collembola and heavy metal pollution in farmlands around a lead-zinc mining area[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58. DOI：10.11766/trxb202004020212. [李进，柯欣，李柱，等. 铅锌矿区周边农田土壤跳虫群落特征与重金属污染的关联[J]. 土壤学报，2021，58. DOI：10.11766/trxb202004020212.]

[40] Li Y J，Wu J H，Chen H L，et al. Nematodes as bioindicator of soil health：Methods and applications[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2005，16（8）：1541—1546. [李玉娟，吴纪华，陈慧丽，等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. 应用生态学报，2005，16（8）：1541—1546.]

[41] Yin R，Kardol P，Thakur M P，et al. Soil functional biodiversity and biological quality under threat：Intensive land use outweighs climate change[J]. Soil Biology & Biochemistry，2020，147：107847.

[42] de Vries F T，Thébault E，Liiri M，et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2013，110（35）：14296—14301.

[43] Khasawneh A R，Othman Y A. Organic farming and conservation tillage influenced soil health component[J]. Fresenius Environmental Bulletin，2020，29（2）：895—902.

[44] Coulibaly S F M，Coudrain V，Hedde M，et al. Effect of different crop management practices on soil Collembola assemblages：A 4-year follow-up[J]. Applied Soil Ecology，2017，119：354—366.

[45] Melman D A，Kelly C，Schneekloth J，et al. Tillage and residue management drive rapid changes in soil macrofauna communities and soil properties in a semiarid cropping system of Eastern Colorado[J]. Applied Soil Ecology，2019，143：98—106.

[46] Wanjiku Kamau J，Biber-Freudenberger L，Lamers J P A，et al. Soil fertility and biodiversity on organic and conventional smallholder farms in Kenya[J]. Applied Soil Ecology，2019，134：85—97.

[47] Li S，Zhu L，Li J，et al. Influence of long-term biosolid applications on communities of soil fauna and their metal accumulation：A field study[J]. Environmental Pollution，2020，260：114017.

[48] Resch M C，Schütz M，Graf U，et al. Does topsoil removal in grassland restoration benefit both soil nematode and plant communities?[J]. Journal of Applied Ecology，2019，56（7）：1782—1793.

[49] Han X，Li Y H，Du X F，et al. Effect of grassland degradation on soil quality and soil biotic community in a semi-arid temperate steppe[J]. Ecological Processes，2020，9（1）：1—11.

[50] Bardgett R D，Leemans D K，Cook R，et al. Seasonality of the soil biota of grazed and ungrazed hill grasslands[J]. Soil Biology & Biochemistry，1997，29（8）：1285—1294.

[51] [51] Winck B R，Rigotti V M，Saccol de Sá E L. Effects of different grazing intensities on the composition and diversity of Collembola communities in southern Brazilian grassland[J]. Applied Soil Ecology，2019，144：98—106.

[52] Pressler Y，Moore J C，Cotrufo M F. Belowground community responses to fire：Meta-analysis reveals contrasting responses of soil microorganisms and mesofauna[J]. Oikos，2019，128（3）：309—327.

[53] Franco A L C，Sobral B W，Silva A L C，et al. Amazonian deforestation and soil biodiversity[J]. Conservation Biology，2019，33（3）：590—600.

[54] Sohlenius B. Structure and composition of the nematode fauna in pine forest soil under the influence of clear-cutting. Effects of slash removal and field layer vegetation[J]. European Journal of Soil Biology，1996，32（1）：1—14.

[55] Du X F，Li Y B，Liu F，et al. Structure and ecological functions of soil micro-food web[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2018，29（2）：403—411. [杜晓芳，李英滨，刘芳，等. 土壤微食物网结构与生态功能[J]. 应用生态学报，2018，29（2）：403—411.]

[56] Gao D D，Wang F M，Li J，et al. Soil nematode communities as indicators of soil health in different land use types in tropical area[J]. Nematology，2020，22（6）：595—610.

[57] Lu Q F，Liu T T，Wang N Q，et al. A review of soil nematodes as biological indicators for the assessment of soil health[J]. Frontiers Agricultural Science and Engineering，2020，7（3）：275—281.

[58] Schloter M，Dilly O，Munch J C. Indicators for evaluating soil quality[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2003，98（1/2/3）：255—262.

[59] Bongers T. The maturity index：An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia，1990，83（1）：14—19.

[60] Ferris H，Bongers T，de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics：Extension of the nematode faunal analysis concept[J]. Applied Soil Ecology，2001，18（1）：13—29.

[61] Zhang X K，Liang W J，Li Q. Recent progress and future directions of soil nematode ecology in China[J]. Biodiversity Science，2018，26（10）：1060—1073. [张

晓珂，梁文举，李琪. 我国土壤线虫生态学研究进展和展望[J]. 生物多样性，2018，26（10）：1060—1073.]

［62］ Mills A A S，Price G W，Fillmore S A E. Responses of nematode，bacterial，and fungal populations to high frequency applications and increasing rates of biosolids in an agricultural soil[J]. Applied Soil Ecology，2020，148：103481.

［63］ Yan S K，Singh A N，Fu S L，et al. A soil fauna index for assessing soil quality[J]. Soil Biology & Biochemistry，2012，47：158—165.

［64］ Menta C，Conti F D，Pinto S，et al. Soil biological quality index（QBS-ar）：15 years of application at global scale[J]. Ecological Indicators，2018，85：773—780.

［65］ Menta C，Leoni A，Bardini M，et al. Nematode and microarthropod communities：Comparative use of soil quality bioindicators in covered dump and natural soils[J]. Environmental Bioindicators，2008，3（1）：35—46.

［66］ Menta C，Tagliapietra A，Caoduro G，et al. Ibs-Bf and Qbs-Ar comparison：Two quantitative indices based on soil fauna community[J]. EC Agriculture，2015，2（5）：427—439.

［67］ Yang X X，Zhou Q X，Wang T L. Connotation and ecological indicators of soil health and its research prospect[J]. Ecological Science，2007，26（4）：374—380. [杨晓霞，周启星，王铁良. 土壤健康的内涵及生态指示与研究展望[J]. 生态科学，2007，26（4）：374—380.]

［68］ Paoletti M G，Sommaggio D，Fusaro S. An earthworms soil quality index proposal（QBS-e）applied to agroecosystems[J]. Biologia Ambientale，2013，27（2）：25—43.

［69］ Pey B，Nahmani J，Auclerc A，et al. Current use of and future needs for soil invertebrate functional traits in community ecology[J]. Basic and Applied Ecology，2014，15（3）：194—206.

［70］ Vandewalle M，de Bello F，Berg M P，et al. Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms[J]. Biodiversity and Conservation，2010，19（10）：2921—2947.

［71］ Gagic V，Bartomeus I，Jonsson T，et al. Functional identity and diversity of animals predict ecosystem functioning better than species-based indices[J]. Proceedings Biological Sciences，2015，282（1801）：20142620.

［72］ Potapov A M，Klarner B，Sandmann D，et al. Linking size spectrum，energy flux and trophic multifunctionality in soil food webs of tropical land-use systems[J]. Journal of Animal Ecology，2019，88（12）：1845—1859.

［73］ Moretti M，Dias A T C，de Bello F，et al. Handbook of protocols for standardized measurement of terrestrial invertebrate functional traits[J]. Functional Ecology，2017，31（3）：558—567.

［74］ Huebner K，Lindo Z，Lechowicz M J. Post-fire succession of collembolan communities in a northern hardwood forest[J]. European Journal of Soil Biology，2012，48：59—65.

［75］ Makkonen M，Berg M P，van Hal J R，et al. Traits explain the responses of a sub-arctic Collembola community to climate manipulation[J]. Soil Biology & Biochemistry，2011，43（2）：377—384.

［76］ Lindberg N，Bengtsson J. Population responses of oribatid mites and collembolans after drought[J]. Applied Soil Ecology，2005，28（2）：163—174.

［77］ Vincent Q，Leyval C，Beguiristain T，et al. Functional structure and composition of Collembola and soil macrofauna communities depend on abiotic parameters in derelict soils[J]. Applied Soil Ecology，2018，130：259—270.

［78］ Hedde M，van Oort F，Lamy I. Functional traits of soil invertebrates as indicators for exposure to soil disturbance[J]. Environmental Pollution，2012，164：59—65.

［79］ Zhu D，Chen Q L，Ding J，et al. Antibiotic resistance genes in the soil ecosystem and planetary health：Progress and prospect[J]. Scientia Sinica：Vitae，2019，49（12）：1652—1663. [朱冬，陈青林，丁晶，等. 土壤生态系统中抗生素抗性基因与星球健康：进展与展望[J]. 中国科学：生命科学，2019，49（12）：1652—1663.]

［80］ Duan G L，Cui H L，Yang Y P，et al. Interactions among soil biota and their applications in synergistic bioremediation of heavy-metal contaminated soils[J]. Chinese Journal of Biotechnology，2020，36（3）：455—470. [段桂兰，崔慧灵，杨雨萍，等. 重金属污染土壤中生物间相互作用及其协同修复应用[J]. 生物工程学报，2020，36（3）：455—470.]

［81］ Shin S C，Kim S H，You H，et al. Drosophila microbiome modulates host developmental and metabolic homeostasis via insulin signaling[J]. Science，2011，334（6056）：670—674.

［82］ Chu H，Mazmanian S K. Innate immune recognition of the microbiota promotes host-microbial symbiosis[J]. Nature Immunology，2013，14（7）：668—675.

［83］ Bouchon D，Zimmer M，Dittmer J. The terrestrial isopod microbiome：An all-in-one toolbox for animal-microbe interactions of ecological relevance[J]. Frontiers in Microbiology，2016，7：1472.

［84］ Zimmer M，Kautz G，Topp W. Do woodlice and earthworms interact synergistically in leaf litter decomposition?[J]. Functional Ecology，2005，19（1）：7—16.

［85］ Agamennone V，Le N G，van Straalen N M，et al. Antimicrobial activity and carbohydrate metabolism in the bacterial metagenome of the soil-living invertebrate *Folsomia candida*[J]. Scientific Reports，2019，9：7308.

[86] Zhu Y G，Zhao Y，Zhu D，et al. Soil biota，antimicrobial resistance and planetary health[J]. Environment International，2019，131：105059.

[87] Zhu Y G，Zhu D，Xu T，et al. Impacts of（ micro ）plastics on soil ecosystem：Progress and perspective[J]. Journal of Agro-Environment Science，2019，38（ 1 ）：1—6. [朱永官，朱冬，许通，等.（ 微 ）塑料污染对土壤生态系统的影响：进展与思考[J]. 农业环境科学学报，2019，38（ 1 ）：1—6.]

[88] Sun M M，Chao H Z，Zheng X X，et al. Ecological role of earthworm intestinal bacteria in terrestrial environments：A review[J]. Science of the Total Environment，2020，740：140008.

[89] Bredon M，Dittmer J，Noël C，et al. Lignocellulose degradation at the holobiont level：Teamwork in a keystone soil invertebrate[J]. Microbiome，2018，6（ 1 ）：162.

[90] Zhu D，An X L，Chen Q L，et al. Antibiotics disturb the microbiome and increase the incidence of resistance genes in the gut of a common soil collembolan[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（ 5 ）：3081—3090.

[91] Zhu D，Chen Q L，An X L，et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition[J]. Soil Biology & Biochemistry，2018，116：302—310.

[92] Zhu D，Zheng F，Chen Q L，et al. Exposure of a soil collembolan to Ag nanoparticles and $AgNO_3$ disturbs its associated microbiota and lowers the incidence of antibiotic resistance genes in the gut[J]. Environmental Science & Technology，2018，52（ 21 ）：12748—12756.

[93] Huerta Lwanga E，Gertsen H，Gooren H，et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*[J]. Environmental Pollution，2017，220：523—531.

[94] Wardle D A. Communities and ecosystems：Linking the Aboveground and Belowground Components [M]. Princeton：Princeton University Press，2002.

[95] Coleman D C，Callaham M A Jr，Crossley D A Jr. Fundamentals of soil ecology[M]. Amsterdam：Academic press，2018.

[96] Moore J C，Walter D E，Hunt H W. Arthropod regulation of micro- and mesobiota in below-ground detrital food webs[J]. Annual Review of Entomology，1988，33（ 1 ）：419—435.

[97] de Ruiter P C，Griffiths B，Moore J C. Biodiversity and stability in soil ecosystems：Patterns，processes and the effects of disturbance// Loreau M，Naeem S，Inchausti P. Biodiversity and ecosystem functioning：synthesis and perspectives. Oxford，UK：Oxford University Press，2002：102—113.

[98] Moore J C，William Hunt H. Resource compartmentation and the stability of real ecosystems[J]. Nature，1988，333（ 6170 ）：261—263.

[99] Morriën E. Understanding soil food web dynamics，how close do we get?[J]. Soil Biology & Biochemistry，2016，102：10—13.

[100] Holtkamp R，Kardol P，van der Wal A，et al. Soil food web structure during ecosystem development after land abandonment[J]. Applied Soil Ecology，2008，39（ 1 ）：23—34.

[101] de Vries F T，Wallenstein M D. Below-ground connections underlying above-ground food production：A framework for optimising ecological connections in the rhizosphere[J]. Journal of Ecology，2017，105（ 4 ）：913—920.

[102] Tsiafouli M A，Thébault E，Sgardelis S P，et al. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe[J]. Global Change Biology，2015，21（ 2 ）：973—985.

[103] Hendrix P F，Parmelee R W，Crossley D A，et al. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems[J]. BioScience，1986，36（ 6 ）：374—380.

[104] Jiang Y J，Luan L，Hu K J，et al. Trophic interactions as determinants of the arbuscular mycorrhizal fungal community with cascading plant-promoting consequences[J]. Microbiome，2020，8（ 1 ）：1—14.

[105] Geisen S，Hu S R，dela Cruz T E E，et al. Protists as catalyzers of microbial litter breakdown and carbon cycling at different temperature regimes[J]. The ISME Journal，2020：1—4.

[106] Eisenhauer N. The action of an animal ecosystem engineer：identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods[J]. Pedobiologia，2010，53（ 6 ）：343—352.

[107] Friberg H，Lagerlöf J，Rämert B. Influence of soil fauna on fungal plant pathogens in agricultural and horticultural systems[J]. Biocontrol Science and Technology，2005，15（ 7 ）：641—658.

[108] Wei Z，Song Y Q，Xiong W，et al. Soil protozoa：Research methods and roles in the biocontrol of soil-borne diseases[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58（ 1 ）：14—22. [韦中，宋宇琦，熊武，等. 土壤原生动物——研究方法及其在土传病害防控中的作用[J]. 土壤学报，2021，58（ 1 ）：14—22.]

[109] Bonkowski M，Geoghegan I E，Birch A N E，et al. Effects of soil decomposer invertebrates（ protozoa and earthworms ）on an above-ground phytophagous insect（ cereal aphid ）mediated through changes in the host plant[J]. Oikos，2001，95（ 3 ）：441—450.

[110] Cameron E K，Martins I S，Lavelle P，et al. Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity[J]. Conservation Biology，2019，33（ 5 ）：1187—1192.

［ 111 ］Bhowmik A，Kukal S S，Saha D，et al. Potential indicators of soil health degradation in different land use-based ecosystems in the shiwaliks of northwestern India[J]. Sustainability，2019，11（14）：3908.

［ 112 ］Fu S L. Strengthening the research on soil fauna diversity and their ecological functions using novel technology and field experimental facility[J]. Biodiversity Science，2018，26（10）：1031—1033. [傅声雷. 利用新方法和野外实验平台加强土壤动物多样性及其生态功能的研究[J]. 生物多样性，2018，26（10）：1031—1033.]

［ 113 ］Dou Y J，Chang L，Wu D H. Research methods of soil animal food web：A review[J]. Chinese Journal of Ecology，2015，34（1）：247—255. [窦永静，常亮，吴东辉. 土壤动物食物网研究方法[J]. 生态学杂志，2015，34（1）：247—255.]

［ 114 ］Scheu S，Schaefer M. Bottom-up control of the soil macrofauna community in a beechwood on limestone：Manipulation of food resources[J]. Ecology，1998，79（5）：1573—1585.

［ 115 ］Jaffee B A，Strong D R. Strong bottom-up and weak top-down effects in soil：Nematode-parasitized insects and nematode-trapping fungi[J]. Soil Biology & Biochemistry，2005，37（6）：1011—1021.

［ 116 ］Wardle D A，Williamson W M，Yeates G W，et al. Trickle-down effects of aboveground trophic cascades on the soil food web[J]. Oikos，2005，111（2）：348—358.

（**责任编辑：**卢　萍）