



杨铭,杨凤霞,李仲瀚,金刚,翟中葳,张克强. 基于文献计量的蚯蚓研究态势与热点分析[J]. 中国农业大学学报,2024,29(10):263-277.
YANG Ming, YANG Fengxia, LI Zhonghan, JIN Gang, ZHAI Zhongwei, ZHANG Keqiang. Research trend and hotspot analysis of earthworms based on bibliometrics[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024,29(10):263-277.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.23

基于文献计量的蚯蚓研究态势与热点分析

杨铭^{1,2} 杨凤霞^{2,3*} 李仲瀚² 金刚⁴ 翟中葳² 张克强^{1,2,3*}

- (1. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150036;
2. 农业农村部 环境保护科研监测所, 天津 300191;
3. 农业农村部华北平原农业绿色低碳重点实验室, 北京 100081;
4. 赤壁市农业农村局, 湖北 赤壁 437300)

摘要 为了解国内外蚯蚓领域研究现状、热点及未来发展趋势,采用文献计量学方法,以“蚯蚓”为关键词,检索 Web of Science 数据库和 CNKI 数据库中 2012—2022 年发表的相关文献,并利用 CiteSpace 软件对获得的文献进行信息挖掘和整理,探究文献数量的演变、核心研究作者和研究机构的分布,分析重要关键词频次和中心性,并在关键词聚类的基础上,进一步对关键词进行实现分析,从时间维度分析该研究领域的演进历程和发展特征。结果表明:1)从蚯蚓研究的总体趋势上看,研究领域英文文献贡献量较大;国际上蚯蚓研究呈快速发展态势,研究热度不断上升;国内相关研究较为稳定。从合作机构上看,中国科学院承担着大量的研究工作,研究成果在世界范围内影响较大。2)已有蚯蚓研究内容较为全面,研究框架与体系也逐步完善;中文文献和英文文献研究方向和热点呈现了不一样的历程,但都很注重蚯蚓堆肥和生态毒理学研究。3)蚯蚓研究热点不断演变、创新;蚯蚓研究热点前期主要围绕对动植物的生长品质影响、蚯蚓堆肥、生态毒理学等方面的基础研究。该领域未来研究热点将转向更深层次的群落结构、肠道微生物等方面的微观研究。

关键词 蚯蚓; 蚯蚓堆肥; 文献计量学; CiteSpace; 前沿动态; 研究热点

中图分类号 G353.1;S185 文章编号 1007-4333(2024)10-0263-15 文献标志码 A

Research trend and hotspot analysis of earthworms based on bibliometrics

YANG Ming^{1,2}, YANG Fengxia^{2,3*}, LI Zhonghan², JIN Gang⁴,
ZHAI Zhongwei², ZHANG Keqiang^{1,2,3*}

- (1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150036, China;
2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China;
3. Key Laboratory of Low-Carbon Green Agriculture in North China of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;
4. Chibi Agriculture and Rural Bureau, Chibi 437300, China)

Abstract In order to understand the current research status, hotspots and future development trend of earthworms at home and abroad, this study retrieved and summarized the related literature published from

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077355);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2024QC28);天津市自然科学基金项目(23JCYBJC00250);中国农业科学院科技创新工程(ITTCRS2021000)。

第一作者: 杨铭(ORCID: 0000-0000-0000-0000), 硕士研究生, E-mail: yangming0440@163.com

通讯作者: 杨凤霞(ORCID: 0000-0000-0000-0000), 副研究员, 主要从事养殖源耐药基因的污染与控制研究, E-mail: yangfengxiacomeon@163.com

张克强(ORCID: 0000-0000-0000-0000), 研究员, 主要从事畜禽养殖废弃物资源化利用与面源污染防治研究与推广工作, E-mail: keqiangzhang68@163.com

2012 to 2022 by using ‘earthworms’ as keyword based on Web of Science and CNKI databases. CiteSpace software was used to mine and organize the information of the obtained literature to explore the evolution of the number of literature, the distribution of core research authors and research institutions. The frequency and centrality of important keywords are analyzed. On the basis of keyword clustering, the keyword emergence analysis was further performed, and the evolution and development characteristics of the field of research in the dimension of time was analyzed. The results show that: 1) From the general trend of earthworm research, the English literature in the research field contributes more. Internationally, the earthworm research has shown a rapid development trend, and the heat of research is increasing. The domestic research is relatively stable, from the perspective of cooperating institutions, the Chinese Academy of Sciences undertakes a large amount of research work, and the research results have a greater impact in the world. 2) The content of the existing earthworm research is more comprehensive, and the research framework and system are also gradually perfected. Chinese literature and English literature research direction and hotspot presents a different course, but are very focused on vermicomposting and ecotoxicology research. 3) The earthworm research hotspot continues to evolve, innovation and its hotspots in the early stage mainly centered on basic research on the effects of growth and quality on plants and animals, vermicomposting, and ecotoxicology. The future research hotspots in this field will shift to deeper community structure, gut microorganisms and other aspects of microscopic research.

Keywords earthworm; vermicomposting; bibliometrics; CiteSpace; frontier dynamics; research hotspot

蚯蚓是土壤中数量最多的无脊椎动物,据其功能和习性主要划分成3种生态型:表栖型(Epigeic)、内栖型(Endogeic)和深栖型(Anecic)。蚯蚓具有分布广、分解及耐污能力强等特点,通过掘穴、蠕动、进食和排便等行为,可改善土壤通气性和疏水性^[1]、提高土壤肥力^[2]、改变微生物群落结构^[3],在维持土壤生态系统和土壤生物量、促进养分循环、废弃物的无害化处理等方面发挥着关键作用,被称为“生态系统工程师”^[4]。

近年来国内外关于蚯蚓的研究颇多,主要集中在蚯蚓堆肥^[5]、土壤环境修复^[6]、污染生态风险评价与毒理实验^[7]、医学临床^[8]、养殖饲料^[9]等方面。但对蚯蚓研究成果缺乏全面、系统地总结分析,相关发文特性、关键文献和研究热点鲜有系统报道,较难从宏观上整体把握该领域的前沿方向,因此有必要利用新方法对近年来蚯蚓研究领域的文献信息进行较全面梳理。为填补目前蚯蚓研究整合分析文献的空白,本研究基于Web of Science数据库(以下简称WoS)和中国知网学术期刊网络出版总库数据库(以下简称CNKI),以“earthworm”和“蚯蚓”为关键词,对2012—2022年发表的蚯蚓研究相关文献检索,并利用CiteSpace软件进行信息挖掘和整理,展现文献数量演变、核心研究作者和研究机构的分布,分析重要关键词频次和中心性,在关键词聚类的基础上,进一步对关键词进行突现分析,最后从

时间维度分析该研究领域的演进历程和发展特征,以探究该领域研究现状、热点及未来发展趋势,为我国今后蚯蚓研究提供新思路。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

数据来源于CNKI和WoS数据库,检索时间为2012—2022年,将时间切片设置为“1年”。中文文献高级检索主题为“蚯蚓”,文献来源类别选择“学术期刊”中“SCI、EI、北大核心、CSSCI、CSCD”。经手动去除年份、作者、研究机构等信息缺失文献或会议、期刊导读、新闻报道等不相关文献,最终得到1 051篇文献,并以“Refworks”格式导出。选择WoS核心合集数据库作为英文数据来源,以TS=(earthworm)为检索式进行主题检索,文献类型包括“Article”“Proceeding Paper”和“Review Article”,共获得7 125篇文献,以“Plain text file”格式导出。

1.2 研究方法

采取CiteSpace软件进行文献综述分析,该软件是由美国德雷塞尔大学陈超美教授基于Java语言开发的CiteSpace信息可视化应用软件^[10-11],是目前最为流行的知识图谱绘制工具之一^[12]。CiteSpace提供多种功能,包括寻找研究前沿和热点,促进知识传播和不同领域之间的互动,探索新兴趋势^[13]。借助CiteSpace 6.1.R6可视化软件,从发文量、作者

合作、机构合作及关键词图谱等方面,对2012—2022年国内外蚯蚓研究成果进行客观、可靠的分析,并且在一定程度上避免了主观性的归纳分析。数据统计在Microsoft Excel中进行。

采用文献关键词共现分析法,剖析该领域的研究热点和发展动向^[14];采用对数似然比(Log-Likelihood Rate, LLR)检验算法对关键词进行聚类分析,以了解该领域相关研究分布情况;运用关键词突现分析法,来明确某一时间段内的前沿研究领域^[15];同时采用了时间线图来展示蚯蚓研究前沿随时间的演化^[16],可探究聚类所反映研究领域的时

2 结果与分析

2.1 国内外蚯蚓研究的基本特征分析

2.1.1 年度发文量变化趋势

2012—2022年间相关蚯蚓研究的文献发文量共计8 176篇。其中来自WoS的文献占87.15%,可见英文文献发文量较多。图1为蚯蚓研究发文量随时间的变化趋势。可见:CNKI数据库收录的相关文献数量增长缓慢,每年的发文量维持在100篇左右;近几年研究者们更加倾向于发表英文文献,且发文量稳步增长。

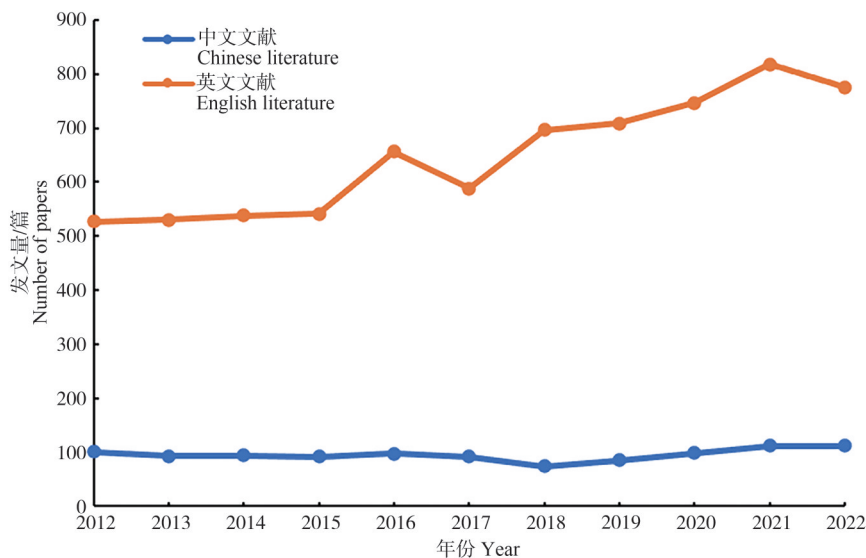


图1 中文文献和英文文献发文量

Fig. 1 The number of publications in Chinese and English

2.1.2 基于发文量的期刊分布

表1为CNKI数据库和WoS数据库中相关蚯蚓研究发文数量排名前10的期刊名称及其载文量。可见在CNKI数据库中,蚯蚓研究载文量前10种期刊的共计载文量为290篇,占检索中文文献总量的28%。其中:发文量前3的期刊分别是《农业环境科学学报》(42篇)、《生态毒理学报》(39篇)和《黑龙江畜牧兽医》(35篇);在WoS数据库中,蚯蚓研究载文量最多的前10种期刊的载文量为1 959篇,占检索英文文献总量的27%。其中,发文量前3的期刊分别是*Applied Soil Ecology*(291篇)、*Environmental Science and Pollution Research*(272篇)和*Science of the Total Environment*(270篇)。从期刊影响因子上看,其中最具影响力的外文期刊为*Journal of Hazardous Materials*,载文量为116篇。

2.1.3 核心作者和合作分析

图2为中、英文文献作者合作网络图谱。由图2(a)可见,中文文献相关蚯蚓研究发文量较高的作者为胡锋,胡锋团队主要围绕农田土壤生态系统中蚯蚓的综合作用以及调控机制展开研究,为将蚯蚓资源纳入可持续农业管理技术体系提供了理论依据^[17-18]。由图2(b)可见,发文量居首位的作者是德国综合生物多样性研究中心(iDiv) Nico Eisenhauer,其研究组和加拿大圣玛丽大学Erin K. Cameron研究组合作探究了蚯蚓多样性的全球分布^[19]。此外,王军、朱鲁生、王金华、李冰等在农药杀菌剂^[20-22]、微塑料^[23]等对蚯蚓毒性作用影响研究方面也形成了一定的合作关系。结合图2(a)和(b)可见:目前各国同一领域作者群体之间的合作不紧密且研究团队成员构成单一,通常由同一机构的成

表1 中文文献和英文文献载文量前10的期刊

Table 1 The top 10 journals with the largest number of articles in Chinese and English

排名 Ranking	中文文献 Chinese literature		英文文献 English literature	
	期刊 Journal	载文量 Article quantity	期刊 Journal	载文量 Article quantity
1	《农业环境科学学报》	42	<i>Applied Soil Ecology</i>	291
2	《生态毒理学报》	39	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	272
3	《黑龙江畜牧兽医》	35	<i>Science of the Total Environment</i>	270
4	《江苏农业科学》	35	<i>Chemosphere</i>	213
5	《环境科学学报》	31	<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	198
6	《北方园艺》	26	<i>Environmental Pollution</i>	193
7	《土壤》	24	<i>Soil Biology & Biochemistry</i>	182
8	《中国土壤与肥料》	20	<i>Zootaxa</i>	117
9	《环境科学与技术》	19	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	116
10	《农业工程学报》	19	<i>European Journal of Soil Biology</i>	107

员组成,缺乏不同机构之间的合作;各研究小组有不同的研究方向且交叉点不多,导致小组之间的横向交流较少,研究力量较为分散,未来交流和协作空间更大。作者群间紧密的学术合作关系对促进蚯蚓研究具有积极影响,今后应该加强不同机构及不同作者间的合作交流。

2.1.4 发文机构合作情况

图3为中文和英文文献机构合作网络图谱。由图3(a)可见:中文文献发文机构主要是高校,学术水平较高,有强大的科研能力;其交流合作大多与所在省份的相关机构展开,在今后的研究中,应不断加强高校、科研院所和企业之间的合作往来,共同推进该主题的理论和应用研究。由图3(b)可见:发表英文文献的该领域的核心研究机构之间的合作比发表中文文献的机构之间密切;其他大部分部分机构之间合作较少,且由于各自研究领域的差异而造成了研究力量的分散;中国科学院是WoS数据库中发文量最高的研究机构,与国内外科研机构有着紧密的合作与交流。作为我国具有较高科研水平的研究机构,中国科学院承担着大量的研究工作,在蚯蚓领域不仅发文量居国际前列,而且其文章具有较大的学

术价值,研究成果在世界范围内有着重要影响^[24]。

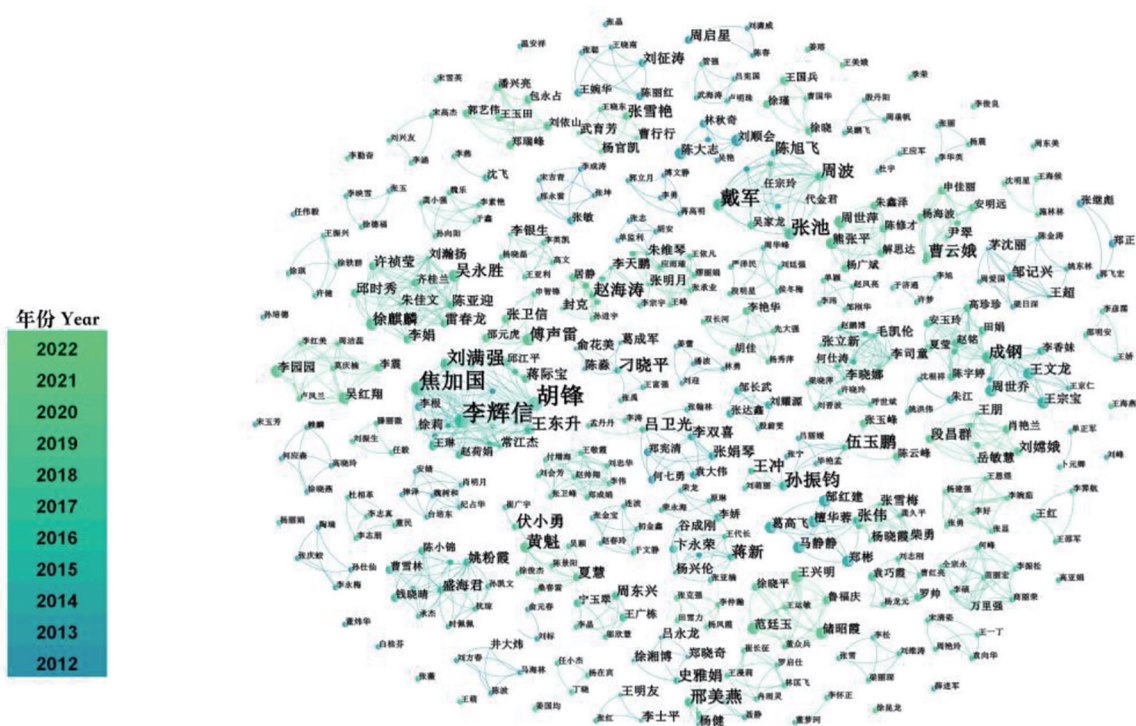
2.2 蚯蚓研究热点分析

2.2.1 关键词共现分析

文献关键词共现图谱结果见图4。由图4(a)可见CNKI数据库中共现频次最高的关键词是“蚯蚓”,其次为“蚯蚓粪”,说明将蚯蚓及其产生的蚯蚓粪的资源化利用为国内现阶段的研究热点;“蚯蚓堆肥”“土壤”和“重金属”出现频次同样较高,近年来蚯蚓在土壤重金属污染及修复中的应用也日益受到人们重视^[25-26]。利用蚯蚓治理土壤重金属污染主要表现在以下两方面:1)蚯蚓通过富集作用将重金属积累于自身组织中,进而降低重金属的生物有效性;2)蚯蚓自身活动可以增强重金属的活性水平,提高重金属的生物有效性^[27]。通过高频关键词可知,中文文献侧重于探究蚯蚓的资源化、无害化利用。

由图4(b)可见:“蚯蚓”的频次同样是最高的,体现了研究的核心内容;排名第2的是“soil”,蚯蚓是土壤健康变化的良好指示生物^[28],其多样性和分布与土壤的健康状况密切相关,在保持土壤生态健康方面具有重要意义^[29];“Toxicity”“*Eisenia foetida*”和“Heavy metal”等关键词出现频次同样

(a)



(b)



一个节点代表元素,节点的大小代表元素频次,节点之间的连线代表元素之间存在联系,连线的宽度代表元素之间联系强度,连线越明显则表示两者之间联系越密切。图3~5同。

A node represents an element, the size of the node represents the frequency of the element, the line between the nodes represents the existence of a connection between the elements, the width of the line represents the strength of the connection between the elements, the more obvious the line is, the closer the connection between the two. Figs 3 to 5 are the same.

图2 中文(a)和英文(b)文献作者合作网络图谱

Fig. 2 Chinese (a) and English (b) literature author collaboration network mapping

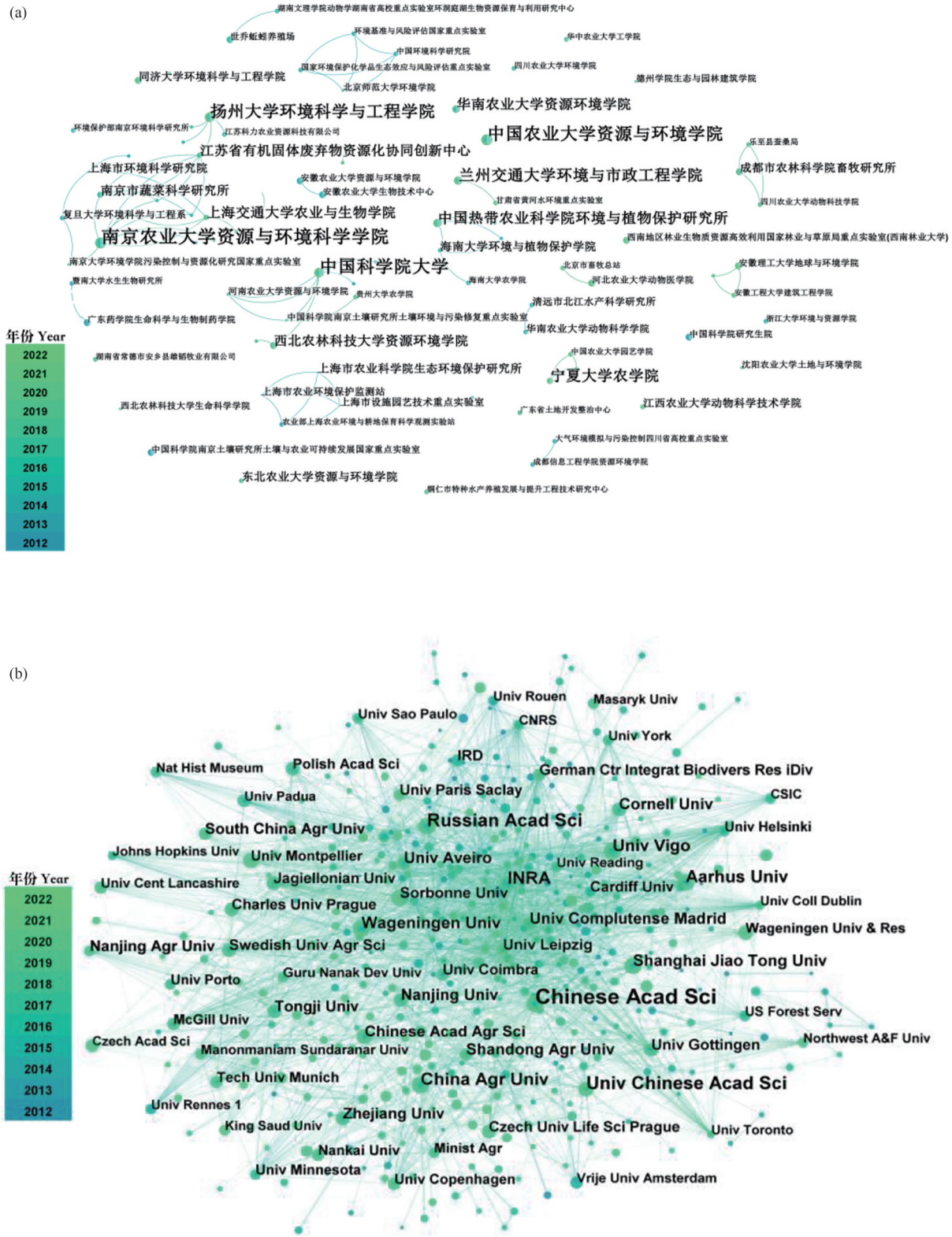


图3 中文(a)和英文(b)文献机构合作网络图谱

Fig. 3 Chinese (a) and English (b) mapping of collaborative networks of documentation organizations

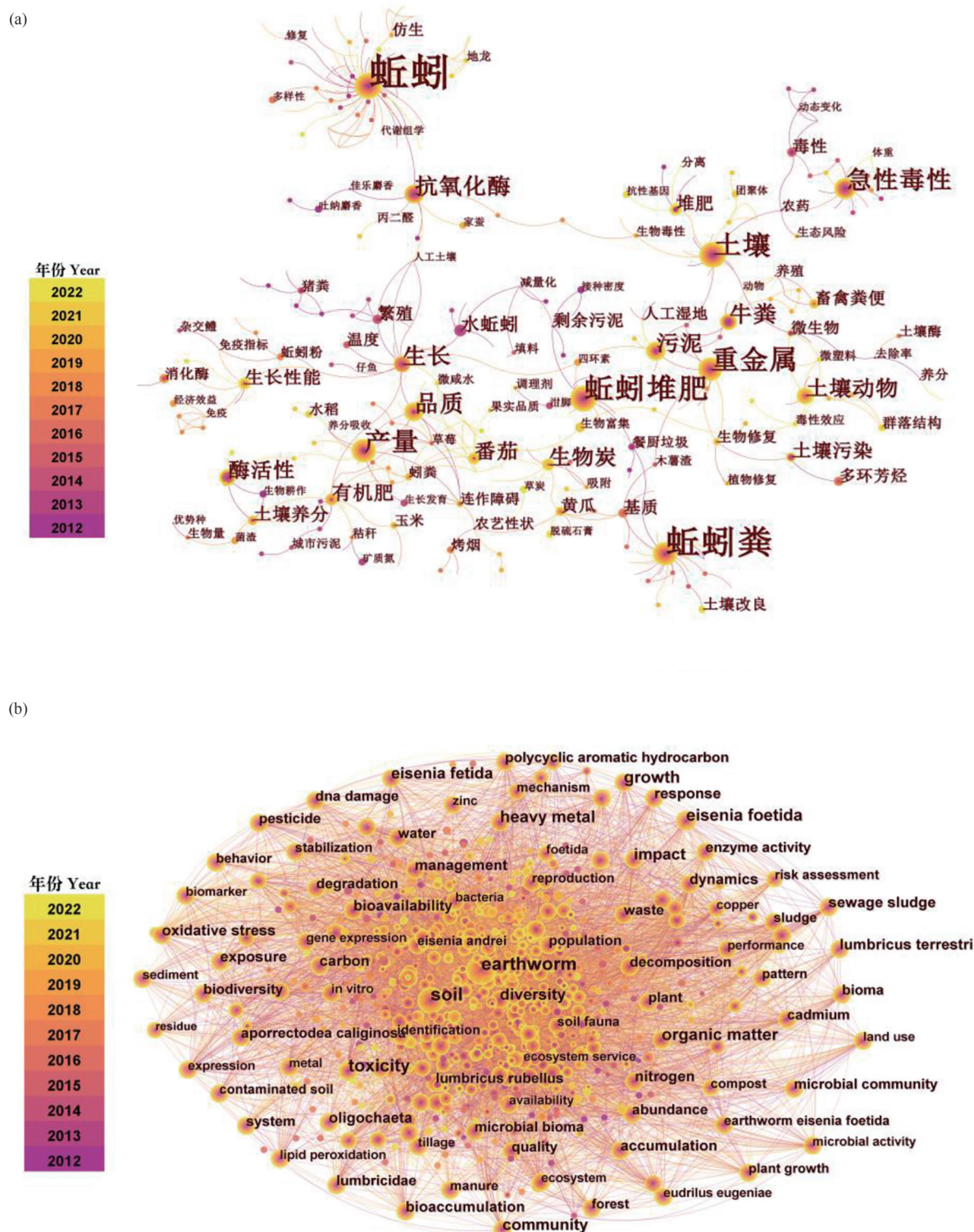


图4 中文(a)和英文(b)文献关键词共现图谱

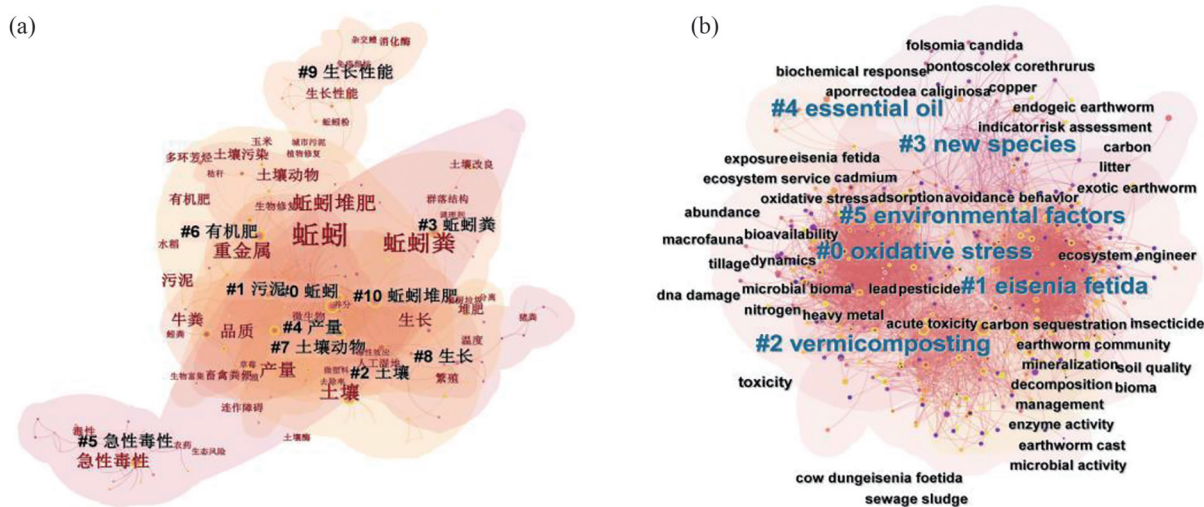
Fig. 4 Keyword co-occurrence mapping of Chinese (a) and English (b) literature

较高,说明研究人员除了将蚯蚓用于改善土壤性质,还多将其用于毒性及重金属的研究。如赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)具有分布广泛、易于饲养、繁殖周期短且对土壤中污染物高度敏感等特点,已被广泛应用于土壤污染毒理学和生态风险评估中^[30]。

2.2.2 关键词聚类分析

图5为文献关键词聚类图谱。可见关键词聚类图谱中有多个聚类部分重叠,表明相关蚯蚓研究虽然各有差异,但主题集中。由图5(a)为中文文献关

键词聚类图谱。可见:中文文献11个聚类分别是#0蚯蚓、#1污泥、#2土壤、#3蚯蚓粪、#4产量、#5急性毒性、#6有机肥、#7土壤动物、#8生长、#9生长性能以及#10蚯蚓堆肥。虽然关键词词数较多,但仍有一定规律可循,其中:聚类#0、#2、#3、#10主要研究内容是蚯蚓堆肥与有机物分解;聚类#1、#5、#7研究内容是围绕蚯蚓对污染土壤改良、修复及其评价和通过蚯蚓反应来评估环境中生态风险及潜在危害;聚类#4、#6、#8、#9主要针对蚯蚓对动植物生长和基质肥力的影响展开研究。



聚类编号越小,表明该聚类下的文献研究规模越大,研究热度越高。

The smaller the cluster number, the larger the research scale of the literature under the cluster and the higher the research heat.

图5 中文(a)和英文(b)文献关键词聚类图谱

Fig. 5 Chinese (a) and English (b) literature keyword clustering mapping

由图5(b)可见英文文献6个聚类分别是Oxidative stress(氧化应激)、*Eisenia foetida*(赤子爱胜蚓)、Vermicomposting(蚯蚓堆肥)、New species(新物种)、Essential oil(精油)和Environmental factors(环境因素)。其中,“蚯蚓堆肥”与其他关键词之间存在着很强的关联性。蚯蚓堆肥相关研究主要集中在4个方面:1)蚯蚓可以富集污泥中重金属,并且降低污泥重金属有效性及生态毒性^[31],并且利用蚯蚓处理城市污泥可提升污泥堆肥产物的微生物种群多样性和丰富度,增加堆肥产物作为微生物肥料的潜力^[32];2)蚯蚓堆肥处置畜禽粪便是一种极具潜力的处理方式,Lv等^[33]利用蚯蚓处理牛粪和猪粪,蚯蚓加速了堆肥过程中有机稳定化,减少了重金属的有效态,减缓了重金属的迁移。此外,

畜禽粪便作为抗生素耐药基因(Antibiotic Resistance Genes, ARGs)的重要储存库^[34-36],研究证实了蚯蚓堆肥可以有效降低整合子基因的丰度^[37],蚯蚓肠道可导致粪肥源ARGs总丰度显著降低,但部分ARGs仍存在上调现象^[38];3)餐厨垃圾含水率高、有机物含量高且易腐烂^[39],通过蚯蚓堆肥工艺来降解餐厨垃圾,可以促进有益细菌的生长,加速腐熟,同时抑制一些潜在的细菌病原体生长^[40];4)园林废弃物含有大量木质素,而加入蚯蚓能够激活降解木质素的微生物,从而缩短堆肥所需的时间^[41],并且在蚯蚓堆肥中添加一定量的外源添加剂,如蘑菇渣^[42]、竹炭^[43]等既能促进蚯蚓的生长和繁殖、加快堆肥进程,又能提高最终堆肥产物的质量。

2.3 蚯蚓研究趋势分析

2.3.1 关键词突现

在关键词聚类的基础上,进一步对关键词进行突现分析,结果见表2。可见:1)中文文献频次前15突现词中突现强度最大的关键词是“水蚯蚓”,突现强度为5.06,

持续时间为2012—2014年,可知其为其间研究热点;2)“生物炭”的突现强度同样较大,为3.98;3)突现时间最长的是“毒性”和“生长”,时间跨度为4年;“有机肥”“生物炭”“群落结构”“水稻”从突现开始一直持续至今,未来有可能朝着与这4个突现词有关的方向继续发展。

表2 中文文献频次前15突现词
Table 2 Top 15 most frequently occurring words in Chinese literature

关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year	2012—2022 年
水蚯蚓	2012	5.06	2012	2014	
繁殖	2012	3.07	2012	2015	
毒性	2012	2.25	2012	2016	
急性毒性	2012	2.21	2012	2014	
生长	2013	2.7	2013	2017	
温度	2013	2.53	2013	2016	
抗氧化酶	2012	2.52	2013	2014	
烤烟	2016	2.71	2016	2018	
蚯蚓粉	2016	2.26	2016	2018	
多环芳烃	2012	2.23	2016	2018	
品质	2012	2.57	2017	2018	
有机肥	2013	2.17	2019	2022	
生物炭	2016	3.98	2020	2022	
群落结构	2020	2.23	2020	2022	
水稻	2020	2.23	2020	2022	

注:红色部分表示关键词持续的时间,浅蓝色部分表示其尚未进入突显阶段的年份。表3同。
Note: The red portion indicates the duration of the keyword, and the light blue portion indicates the years in which it has not yet entered the prominence phase. Table 3 is the same.

表3为英文文献频次前15突现词汇汇总。可见:“入侵”突现强度最大,高达10.02。外来物种入侵严重威胁着生态系统的物种多样性,之前的入侵生态学研究重点在于植物和脊椎动物的入侵,但像蚯蚓这样的土壤动物的入侵也受到了一定的关注;除“入侵”外,“阔叶林”和“北部阔叶林”突现强度同样较高;“固体废弃物”“代谢”“食物”“温室气体排放”“植物多样性”“肠道微生物”“抗生素抗性基因”自突现以来一直延续至今,有望在今后继续受到关注,成为研究的热点与前沿。

2.3.2 时间线图

将关键词共现图谱转换为时间线图(图6)。通过对图6(a)分析,将CNKI数据库中关于蚯蚓研究内容分为研究起步期、发展期与创新期三阶段:1)2012—2015年为起步期,研究主要集中在蚯蚓堆肥的循环利用、环境中有毒污染物(如剧毒、致癌性农药和持久性污染物等)的去除和影响动植物生长等方面;2)2016—2020年为发展期,出现了“代谢组学”“酶活性”“抗生素”等关键词,开始转向微观层次研究;3)2021—2022年为创新期,随着科技的发

表3 英文文献频次前15突现词
Table 3 Top 15 most frequently occurring words in English literature

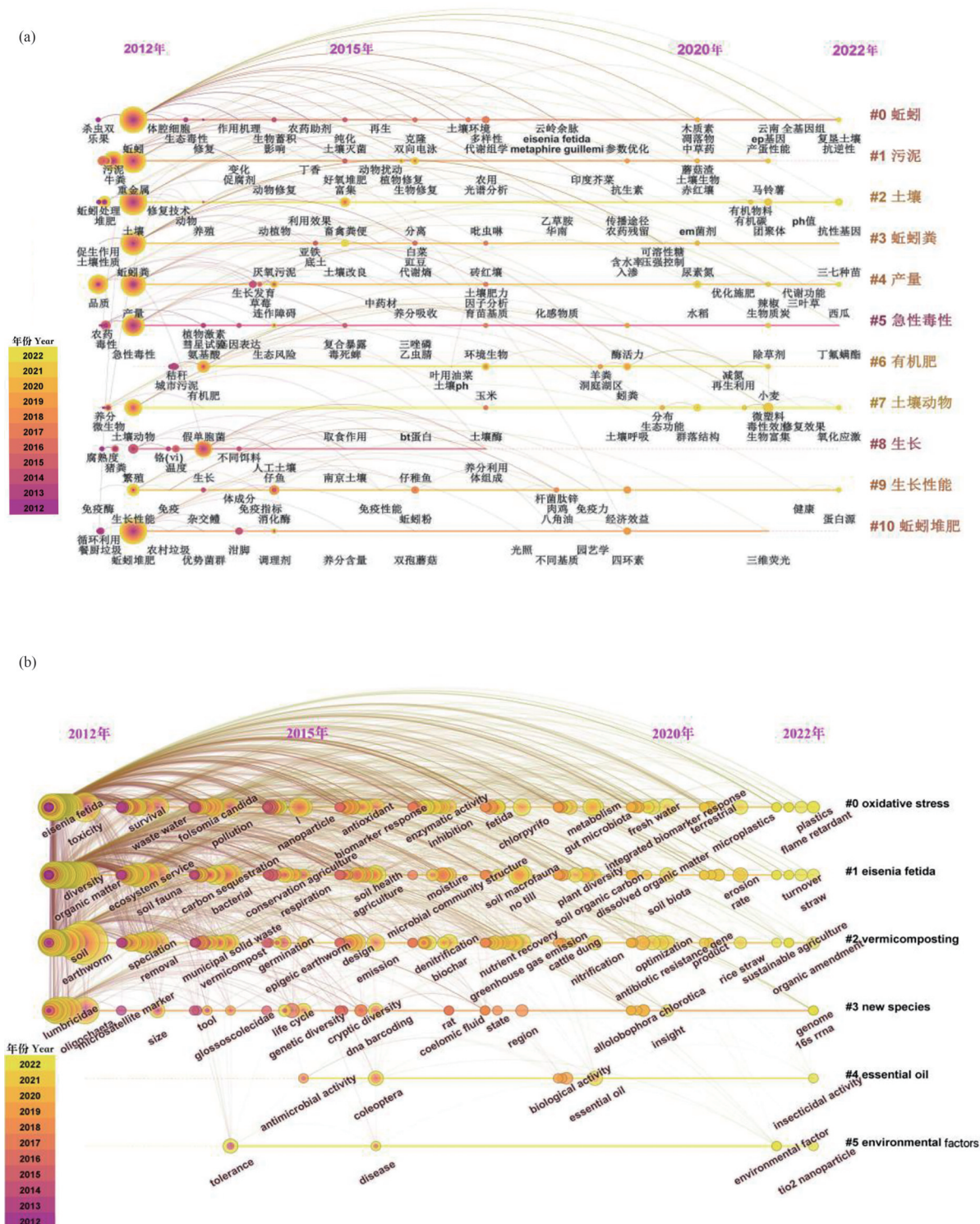
关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year	2012—2022年
Invasion	2012	10.02	2012	2015	
Hardwood forest	2012	9.67	2012	2017	
Northern hardwood forest	2012	8.76	2012	2016	
Dendrobaena octaedra	2012	8.19	2012	2015	
Earthworm invasion	2012	6.82	2012	2015	
Fractionation	2013	7.18	2013	2014	
Daphnia magna	2014	6.96	2014	2018	
Sewage treatment	2014	6.82	2014	2016	
Solid waste	2018	7.12	2018	2022	
Metabolism	2019	8.48	2019	2022	
Food	2013	7.44	2019	2022	
Greenhouse gas emission	2018	6.91	2019	2022	
Plant diversity	2019	6.85	2019	2022	
Gut microbiota	2019	9.58	2020	2022	
Antibiotic resistance gene	2020	7.21	2020	2022	

展,“群落结构”“全基因组”“抗性基因”等主题大量涌现,成为了近年来研究热点。ARGs作为畜禽养殖废弃物、剩余污泥以及农田土壤中重要的新型污染物,也受到了学者们的广泛关注。蚯蚓堆肥可以削减有机固体废弃物中的病原菌,还可削减 ARGs 污染物^[44]。蚯蚓的加入可以改变土壤中优势菌门的丰度占比,加速土壤中金霉素的降解,且不同生态型蚯蚓对细菌群落结构的影响存在差异^[45]。细菌是 ARGs 主要携带者,ARGs 的命运与其宿主菌的命运密切相关,因此,跟踪蚯蚓堆肥过程中细菌群落结构的动态变化可为深入解析 ARGs 演化的生物学机制提供可能性。

由图 6(b)分析可知,WoS 数据库相关蚯蚓研究一直以#0 氧化应激、#1 赤子爱胜蚓、#2 蚯蚓堆肥这 3 个聚类为研究重点,始终保持着较高的研究热度,表明研究人员对生态风险评价研究重视程度较高且取得了丰富成果。近年来,因污染物胁迫下产生的氧化应激响应灵敏且检测方法日趋成熟,分子生物标志物也已成为了土壤污染风险评估和早期预警系统的重要指标,也是生态毒理学的研究热

点^[46]。蚯蚓体抗氧化酶和丙二醛含量变化对毒性化学污染物反应灵敏,且测定简便、稳定,常作为化学污染物生态毒性的评价指标^[47]。

结合图 6(a)和(b)可见,2012 年是该领域研究繁荣的阶段,也为此后的研究方向奠定了基础。值得注意的是,以二氧化碳(CO₂)为主的温室气体排放造成的全球变暖问题一直备受关注。蚯蚓自身的呼吸作用及蠕动会影响温室气体的排放^[48],但它们还稳定了大部分消化过的碳,将其固存在土壤中,这也证实了蚯蚓的固碳潜力^[49];同时蚯蚓还能抑制土壤微团聚体中的碳矿化,实现土壤碳库存的长期稳定^[50]。但不同的生存条件、不同生态类群的蚯蚓对温室气体排放影响也不同^[48],因此如何利用蚯蚓平衡土壤循环和促进土壤碳中和是未来值得进一步探索的重要科学问题。随着转录组学、代谢组学和基因组学等高通量测序技术的快速发展,国内外学者通过测定蚯蚓体内基因的表达、蛋白质和代谢物、肠道微生物多样性对蚯蚓展开了更为深层的研究^[51-54]。



节点越大代表关键词频数越高,知识流向从深色到浅色,且相近深浅代表聚类集中性,关键词共现以节点连线表示。

Larger nodes represent higher keyword frequency, knowledge flow from dark to light and similar shades represent cluster concentration, and keyword co-occurrence is represented by connecting lines between nodes.

图 6 中文(a)和英文(b)文献时间线图

Fig. 6 Map of the timeline of Chinese (a) and English (b) literature

3 结论与展望

3.1 结论

本研究通过 CiteSpace 软件对 2012—2022 年来 Web of Science 数据库和 CNKI 数据库中蚯蚓研究领域的相关文献进行可视化分析,主要结论如下:

1)从国内外蚯蚓研究的总体趋势上看,研究领域英文文献贡献量较高。国际上蚯蚓研究呈快速发展态势,研究热度不断上升,国内相关研究较为稳定;中、英文文献载文量第 1 的期刊分别是《农业环境科学学报》和 *Applied Soil Ecology*;胡锋与 Nico Eisenhauer 分别作为中、英文文章排名首位的学者,为蚯蚓研究做出了突出贡献;从合作机构上看,中国科学院承担着大量的研究工作,研究成果在世界范围内有着重要影响。

2)蚯蚓研究内容较为全面,研究框架与体系逐步完善。中文文献研究主要围绕蚯蚓堆肥、蚯蚓对污染土壤改良/修复及其评价,以及通过蚯蚓反应来评估环境中生态风险及潜在危害等方面;英文文献研究主要围绕蚯蚓堆肥以及土壤污染毒理学和生态风险评估等方面。中文文献和英文文献研究领域的发展方向和热点呈现了不一样的研究历程,但都很注重蚯蚓堆肥和生态毒理学研究。

3)蚯蚓研究热点不断演变、创新。蚯蚓研究热点前期主要围绕对动植物的生长品质影响、蚯蚓堆肥、生态毒理学等方面的基础研究。随着科学技术的不断进步,研究者将蛋白质组学、代谢组学、宏基因组等多学科技术组合运用于蚯蚓研究,研究方向转向更深层次的群落结构、肠道微生物等方面的微观研究,也将成为今后的主要研究热点。

3.2 展望

虽然目前关于蚯蚓的研究已经进入了多学科、多领域相互融合和交叉的研究阶段,但仍有以下核心问题亟待解决:

1)作者群体之间的合作不紧密,不同国家、机构之间缺乏合作,导致研究力量较为分散,未来还有较大的交流和协作空间,今后应该加强学者和机构的合作网络建设,完善合作机制,搭建交流合作平台,推动不同学科、不同领域的成果交流与研究合作。

2)相关蚯蚓研究大多停留在实验室阶段,要不

断加强理论研究与实践创新,将理论研究应用于解决实际问题,为蚯蚓研究提供更多数据和理论支持,从而更好的指导蚯蚓研究与应用实践。

3)土壤中蚯蚓种类繁多,且不同生态类型蚯蚓食性和生态习性的差异较大。在未来研究人员可以针对不同生态型蚯蚓开展深入研究,分析不同生态型蚯蚓的优势及缺陷所在,重点关注、研究不同类群蚯蚓的生态功能差异。

参考文献 References

- [1] 白岗柱, 邹超煜, 邵发琦, 杨凯齐. 自然生草和蚯蚓对渭北旱塬苹果园土壤特性及苹果品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(3): 146-157
Bai G S, Zou C Y, Shao F Q, Yang K Q. Effects of self-sown grass and earthworm on the soil property and apple quality of apple orchards in Weibei dry plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(3): 146-157 (in Chinese)
- [2] Ahmed N, Al-Mutairi K A. Earthworms effect on microbial population and soil fertility as well as their interaction with agriculture practices[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7803
- [3] Yang J J, Schrader S, Tebbe C C. Legacy effects of earthworms on soil microbial abundance, diversity, and community dynamics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 190: 109294
- [4] Xiao R, Ali A, Xu Y Q, Abdelrahman H, Li R H, Lin Y B, Bolan N, Shaheen S M, Rinklebe J, Zhang Z Q. Earthworms as candidates for remediation of potentially toxic elements contaminated soils and mitigating the environmental and human health risks: A review [J]. *Environment International*, 2022, 158: 106924
- [5] Zhou Y W, Xiao R, Klammersteiner T, Kong X L, Yan B H, Mihai F C, Liu T, Zhang Z Q, Kumar Awasthi M. Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: A review[J]. *Bioresour Technol*, 2022, 360: 127591
- [6] Zeb A, Li S, Wu J N, Lian J P, Liu W T, Sun Y B. Insights into the mechanisms underlying the remediation potential of earthworms in contaminated soil: A critical review of research progress and prospects [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140145
- [7] He F L, Liu R T. Mechanistic insights into phenanthrene-triggered oxidative stress-associated neurotoxicity, genotoxicity, and behavioral disturbances toward the brandling worm (*Eisenia fetida*) brain: The need for an ecotoxicological evaluation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 450: 131072
- [8] Wu Y L, Ma Y N, Zhong W L, Shen H J, Ye J H, Du S Y, Li P Y. Alleviation of endothelial dysfunction of *Pheretima guillemi* (Michaelsen)-derived protein DP3 in ponatinib-induced thrombotic zebrafish and mechanisms explored through ox-LDL-induced HUVECs and TMT-based proteomics[J]. *Journal of ethnopharmacology*, 2023, 323117669-117669
- [9] Nugraha T A, Isnansetyo A, Triyanto, Djalil M. Fermented earthworms as a feed additive enhances non-specific immune response in catfish (*Clarias gariepinus*) [J]. *Aquaculture International*, 2022, 30 (1) : 211-226
- [10] Chen C M. Searching for intellectual turning points: Progressive

- knowledge domain visualization. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101(suppl), 5303-5310[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(Supplement 1): 5303-5310
- [11] Chen C M. CiteSpace II : Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377
- [12] 孙新宇. 基于 CITESPACE 的国内外游泳运动研究动态对比分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021
- Sun X Y. Dynamic comparative analysis of domestic and foreign swimming sports research based on CITESPACE [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021 (in Chinese)
- [13] Chen C M, Dubin R, Kim M C. Emerging trends and new developments in regenerative medicine: A scientometric update (2000 - 2014) [J]. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 2014, 14(9): 1295-1317
- [14] 沈良英, 蒋红明, 黎梅杰, 余超, 蔡明, 罗富成, 薛世明, 黄必志. 基于文献计量的果园生草栽培技术研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(2): 74-89
- Shen L Y, Jiang H M, Li M J, Yu C, Cai M, Luo F C, Xue S M, Huang B Z. Research progress of cultivation technology for interplanting grass in orchard based on bibliometrics [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(2): 74-89 (in Chinese)
- [15] 覃诚, 方向明, 陈典. 中国农村产业融合发展研究现状与展望: 基于 CiteSpace 文献计量分析[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(10): 198-208
- Qin C, Fang X M, Chen D. Research status and prospects of rural industrial integration in China: An bibliometric analysis based on CiteSpace[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10): 198-208 (in Chinese)
- [16] 李凯, 李泽宇, 梁月荣, 陆建良, 郑新强. 基于文献计量的国内外茶树干旱研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(6): 50-62
- Li K, Li Z Y, Liang Y R, Lu J L, Zheng X Q. Research progress of tea tree drought based on bibliometrics [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(6): 50-62 (in Chinese)
- [17] 杨巍, 胡锋, 王东升, 刘满强, 李辉信, 黄忠阳, 常义军, 焦加国. 不同比例茶渣蚓粪基质对番茄幼苗生长的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(4): 395-400
- Yang W, Hu F, Wang D S, Liu M Q, Li H X, Huang Z Y, Chang Y J, Jiao J G. Effects of different quantities of tea-leaf wormcast substrate on the growth of tomato seedling[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(4): 395-400 (in Chinese)
- [18] 焦加国, 朱玲, 李辉信, 刘满强, 胡锋. 蚯蚓活动和秸秆施用方式对土壤生物学性质的动态影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 209-213, 218
- Jiao J G, Zhu L, Li H X, Liu M Q, Hu F. Dynamic effects of soil biological properties under earthworm inoculation and organic matter application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 209-213, 218 (in Chinese)
- [19] Phillips H R P, Guerra C A, Bartz M L C, Briones M J I, Brown G, Crowther T W, Ferlian O, Gongalsky K B, van den Hoogen J, Krebs J, Orgiazzi A, Routh D, Schwarz B, Bach E M, Bennett J, Brose U, Decaens T, König-Ries B, Loreau M, Mathieu J, Mulder C, van der Putten W H, Ramirez K S, Rillig M C, Russell D, Rutgers M, Thakur M P, de Vries F T, Wall D H, Wardle D A, Arai M, Ayuke F O, Baker G H, Beauséjour R, Bedano J C, Birkhofer K, Blanchart E, Blossey B, Bolger T, Bradley R L, Callahan M A, Capowiez Y, Caulfield M E, Choi A, Crotty F V, Dávalos A, Díaz Cosin D J, Dominguez A, Duhour A E, van Eekeren N, Emmerling C, Falco L B, Fernández R, Fonte S J, Frago C, Franco A L C, Fugère M, Fusilero A T, Gholami S, Gundale M J, López M G, Hackenberger D K, Hernández L M, Hishi T, Holdsworth A R, Holmstrup M, Hopfensperger K N, Lwanga E H, Huhta V, Hurisso T T, Iannone B V 3rd, Iordache M, Joschko M, Kaneko N, Kanianska R, Keith A M, Kelly C A, Kernecker M L, Klaminder J, Koné A W, Kooch Y, Kukkonen S T, Lalthanzara H, Lammel D R, Lebedev I M, Li Y Q, Jesus Lidon J B, Lincoln N K, Loss S R, Marichal R, Matula R, Moos J H, Moreno G, Morón-Rios A, Muys B, Neirynck J, Norgrove L, Novo M, Nuutinen V, Nuzzo V, Mujeeb R P, Pansu J, Paudel S, Pérès G, Pérez-Camacho L, Pineiro R, Ponge J F, Rashid M I, Rebollo S, Rodeiro-Iglesias J, Rodriguez M Á, Roth A M, Rousseau G X, Rozen A, Sayad E, van Schaik L, Scharenbroch B C, Schirrmann M, Schmidt O, Schröder B, Seeber J, Shashkov M P, Singh J, Smith S M, Steinwandter M, Talavera J A, Trigo D, Tsukamoto J, de Valença A W, Vanek S J, Virto I, Wackett A A, Warren M W, Wehr N H, Whalen J K, Wironen M B, Wolters V, Zenkova I V, Zhang W X, Cameron E K, Eisenhauer N. Global distribution of earthworm diversity [J]. *Science*, 2019, 366(6464): 480-485
- [20] Wang J H, Zhu L S, Liu W, Wang J, Xie H. Biochemical responses of earthworm (*Eisenia foetida*) to the pesticides chlorpyrifos and fenvalerate [J]. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 2012, 22(3): 236-241
- [21] Wang J, Wang J H, Wang G C, Zhu L S, Wang J. DNA damage and oxidative stress induced by imidacloprid exposure in the earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 510-517
- [22] Wu R L, Zhou T T, Wang J, Wang J H, Du Z K, Li B, Juhasz A, Zhu L S. Oxidative stress and DNA damage induced by trifloxystrobin on earthworms (*Eisenia fetida*) in two soils [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149004
- [23] Li B, Song W H, Cheng Y L, Zhang K H, Tian H M, Du Z K, Wang J H, Wang J, Zhang W, Zhu L S. Ecotoxicological effects of different size ranges of industrial-grade polyethylene and polypropylene microplastics on earthworms *Eisenia fetida*[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 783: 147007
- [24] Shao Y, Wang X B, Zhang J J, Li M L, Wu S S, Ma X Y, Wang X, Zhao H F, Li Y, Zhu H H, Irwin D M, Wang D P, Zhang G J, Ruan J, Wu D D. Genome and single-cell RNA-sequencing of the earthworm *Eisenia andrei* identifies cellular mechanisms underlying regeneration [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2656
- [25] Borah G, Deka H M. Vermiremediation of heavy metals (HMs)-contaminated agricultural land: Synergistic changes in soil enzyme activities and earthworm's growth parameters [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(54): 115266-115278
- [26] Žaltauskaitė J, Kniūpytė I, Praspaliauskas M. Earthworm *Eisenia fetida* potential for sewage sludge amended soil valorization by heavy metal remediation and soil quality improvement [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Pt A): 127316
- [27] Wang J, Shi L, Liu J Q, Deng J, Zou J W, Zhang X K, Shen Z G, Chen Y H. Earthworm-mediated nitrification and gut digestive processes facilitate the remobilization of biochar-immobilized heavy metals [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 322: 121219
- [28] Wang B J, Jiang L, Pan B, Lin Y. Toxicity of glufosinate-ammonium in

- soil to earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(5): 1469-1478
- [29] Li X X, Li M A, Jiang N, Yao X F, Wang Q, Lv H J, Wang C, Wang J. Evaluation of soil ecological health after exposure to environmentally relevant doses of Di (2-ethylhexyl) phthalate: Insights from toxicological studies of earthworms at different ecological niches [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 322: 121204
- [30] Yao X F, Wang C, Li M A, Jiao Y H, Wang Q, Li X X, Liu K X, Liu G Y, Wang J H, Zhu L S, Wang J. Extreme environmental doses of diisobutyl phthalate exposure induce oxidative stress and DNA damage in earthworms (*Eisenia fetida*): Evidence at the biochemical and molecular levels [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331: 117321
- [31] Ameen F, Al-Homaidan A A. Treatment of heavy metal-polluted sewage sludge using biochar amendments and vermistabilization [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(12): 861
- [32] Domínguez J, Aira M, Crandall K A, Pérez-Losada M. Earthworms drastically change fungal and bacterial communities during vermicomposting of sewage sludge [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 15556
- [33] Lv B Y, Xing M Y, Yang J. Speciation and transformation of heavy metals during vermicomposting of animal manure [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 209: 397-401
- [34] Yang F X, Zhang K Q, Zhi S L, Li J J, Tian X L, Gu Y R, Zhou J. High prevalence and dissemination of β -lactamase genes in swine farms in Northern China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 651(Pt 2): 2507-2513
- [35] Yang F X, Tian X L, Han B J, Zhao R, Li J J, Zhang K Q. Tracking high-risk β -lactamase gene (bla gene) transfers in two Chinese intensive dairy farms [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 274: 116593
- [36] Singh K S, Anand S, Dholpuria S, Sharma J K, Blankenfeldt W, Shouche Y. Antimicrobial resistance dynamics and the one-health strategy: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(4): 2995-3007
- [37] 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖. 四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3263-3269
- Chen J Y, Xia H, Huang K, Wu Y. Effects of tetracycline on microbial communities and antibiotic resistance genes of vermicompost from dewatered sludge [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3263-3269 (in Chinese)
- [38] Tian X L, Han B J, Liang J F, Yang F X, Zhang K Q. Tracking antibiotic resistance genes (ARGs) during earthworm conversion of cow dung in Northern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 222: 112538
- [39] 梅彩虹. 餐厨垃圾固体处理与资源化利用分析 [J]. *环境与发展*, 2018, 30(10): 56, 58
- Mei C H. Analysis of solid waste treatment and resource utilization of kitchen waste [J]. *Environment and Development*, 2018, 30(10): 56, 58 (in Chinese)
- [40] Miao L J, Wang Y F, Zhang M Y, Feng Y N, Wang L, Zhang H J, Zhu W Q. Effects of hydrolyzed polymaleic anhydride addition combined with vermicomposting on maturity and bacterial diversity in the final vermicompost from the biochemical residue of kitchen waste [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(4): 8998-9010
- [41] Chen Y X, Zhang Q G, Zhang Y F, Chen J, Zhang D G, Tong J. Changes in fibrolytic enzyme activity during vermicomposting of maize stover by an anecic earthworm *Amyntas hupeiensis* [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, 120: 169-177
- [42] 王琳, 李素艳, 孙向阳, 龚小强, 余克非, 蔡琳琳. 不同配比园林绿化废弃物和蘑菇渣混合蚯蚓堆肥的效果 [J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(2): 326-334
- Wang L, Li S Y, Sun X Y, Gong X Q, Yu K F, Cai L L. Mixing garden wastes and spent mushroom compost of different ratios for vermicomposting [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2019, 36(2): 326-334 (in Chinese)
- [43] Gong X Q, Cai L L, Li S Y, Chang S X, Sun X Y, An Z F. Bamboo biochar amendment improves the growth and reproduction of *Eisenia fetida* and the quality of green waste vermicompost [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 156: 197-204
- [44] Zhu D, Delgado-Baquerizo M, Su J Q, Ding J, Li H, Gillings M R, Penuelas J, Zhu Y G. Deciphering potential roles of earthworms in mitigation of antibiotic resistance in the soils from diverse ecosystems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7445-7455
- [45] 杨思德, 常兴平, 潘政, 李明堂, 翁莉萍, 李永涛, 赵丽霞. 蚯蚓对金霉素污染土壤酶活性和微生物群落的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6): 1268-1280
- Yang S D, Chang X P, Pan Z, Li M T, Weng L P, Li Y T, Zhao L X. Effects of earthworms on soil enzyme activities and microbial communities of chlortetracycline-contaminated soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1268-1280 (in Chinese)
- [46] Soares C, Fernandes B, Paiva C, Nogueira V, Cachada A, Fidalgo F, Pereira R. Ecotoxicological relevance of glyphosate and flazasulfuron to soil habitat and retention functions-Single vs combined exposures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442: 130128
- [47] Zhao S Q, Ni H, Li J, Ai S H, Wang X N, Gao X Y, Xu Q Y, Liu Z T. Ecotoxicity stress and bioaccumulation in *Eisenia fetida* earthworms exposed to vanadium pentoxide in soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(19): 54657-54665
- [48] 卢明珠, 吕宪国, 管强, 武海涛. 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1209-1225
- Lu M Z, Lü X G, Guan Q, Wu H T. Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1209-1225 (in Chinese)
- [49] Zhang W X, Hendrix P F, Dame L E, Burke R A, Wu J P, Neher D A, Li J X, Shao Y H, Fu S L. Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2576
- [50] Li Y P, Wang J, Shao M A. Application of earthworm cast improves soil aggregation and aggregate-associated carbon stability in typical soils from Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278(Pt 1): 111504
- [51] Zhang R K, Zhou Z Q, Zhu W T. Evaluating the effects of the tebuconazole on the earthworm, *Eisenia fetida* by H-1 NMR-Based untargeted metabolomics and mRNA assay [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 194: 110370
- [52] Liu L, Wu Q C, Miao X Y, Fan T L, Meng Z Y, Chen X J, Zhu W T. Study on toxicity effects of environmental pollutants based on metabolomics: A review [J]. *Chemosphere*, 2022, 286(Pt 2): 131815
- [53] Chan W T, Medriano C A, Bae S. Unveiling the impact of short-term polyethylene microplastics exposure on metabolomics and gut microbiota in earthworms (*Eudrilus euganiae*) [J]. *Journal of Hazardous*

Materials, 2023, 460: 132305

resistome in the earthworm gut[J]. *Microbiome*, 2022, 10(1): 63

[54] Song J J, Li T X, Zheng Z R, Fu W J, Long Z N, Shi N, Han Y L, Zhang L Q, Yu Y L, Fang H. Carbendazim shapes microbiome and enhances

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 杨铭, 硕士研究生, 现就读于东北农业大学资源利用与植物保护专业。2022年毕业于吉林农业大学资源与环境学院, 本科期间曾多次获得纯农奖学金, 并获“优秀学生共青团干部”及校级“优秀本科生”称号。攻读硕士期间获得新生学业奖学金1次、甲等助学金1次。



通讯作者简介: 杨凤霞, 副研究员, 现任农业农村部环境保护科研监测所养殖业污染防治创新团队科研骨干, 主要从事农业环境中新型污染物的污染过程与机理、农业废弃物的无害化处理与安全利用等方面的研究。主持参加科研项目近10项, 包括国家自然科学基金项目2项、中国博士后基金1项、农业农村部项目1项。发表论文近50篇, 其中SCI论文30余篇; 主编著作1部, 参编1部; 授权发明专利2件、实用新型2件。



通讯作者简介: 张克强, 研究员、博士生导师。长期从事畜禽养殖废弃物资源化利用与面源污染防治研究与推广工作。先后主持“十三五”、“十四五”国家重点研发计划项目、国家自然科学基金面上项目、公益性行业(农业)科研专项等国家级项目/课题10余项。以第一完成人获得省部级奖项9项, 其中一等奖3项; 授权国家发明专利26项, 发表学术论文280余篇(SCI收录73篇, 其中一作和通讯作者累计影响因子188.3); 修制订国家标准1项、地方标准11项; 出版著作4部。培养中国农业科学院优秀博士后2名、硕博士60名, 培育中国农学会青年科技奖获得者、天津市“131”创新型人才第一层次人选、天津市青年拔尖人才等8名。