

土壤酶研究热点与趋势

——基于知识图谱分析

段 淳, 刘元生*

贵州大学农学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年7月11日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年9月25日

摘 要

土壤酶是影响土壤物质循环与能量流动的关键因素, 目的: 为了摸清我国近年来土壤酶的研究热点和发展动态, 从存在问题和关注热点出发, 提出下一步的研究重点。方法: 基于CNKI学术期刊数据库借助CiteSpace软件采用文献计量学方法对关键词、发文机构、主题等进行了分类与可视化分析。结果: 当前农业类高校是研究的中坚力量, 但各高校之间合作力度不足一定程度上阻碍了土壤酶研究的创新发展。土壤酶活性与土壤肥力关系一直是土壤酶研究的关注热点, 研究方向主要集中基于土壤微生态变化视角, 探讨土壤酶与土壤质地、养分、微生物的关系, 有效改善土壤微生物群落结构, 提高土壤酶活性和养分利用效率, 解决农业生产问题。结论: 计量分析有助于全面认识我国土壤酶的研究状况, 为土壤酶研究的发展技术的创新, 提供思考与借鉴。

关键词

文献计量, 科学知识图谱, 土壤酶, 研究热点

Research Focus and Trends of Soil Enzyme

—Based on the Knowledge Graph Analysis

Chun Duan, Yuansheng Liu*

College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Jul. 11th, 2023; accepted: Sep. 14th, 2023; published: Sep. 25th, 2023

Abstract

Soil enzymes are the key factors affecting the circulation of soil substances and energy flow. Objective: In order to find out the research hotspots and development dynamics of soil enzymes in China in recent years, the next research foci are proposed from the existing problems and concerns. Me-

*通讯作者。

thod: Based on CNKI academic journal database, with CiteSpace software, bibliometric method is used to classify and visualize keywords, publishing institutions and topics. Result: At present, agricultural universities are the backbone of research, but the lack of cooperation among universities has hindered the innovative development of soil enzyme research to some extent. The relationship between soil enzyme activity and soil fertility has been the focus of soil enzyme research. The research direction is mainly based on soil biomass variation perspective, discussing the relationship between soil enzymes and soil texture, nutrients, and microorganisms, effectively improving soil microbial community structure, improving the efficiency of soil enzyme activity and nutrient utilization, and solving the problem of agricultural production. Conclusion: Measurement analysis is helpful to fully understand the research status of soil enzyme in China, and to provide thinking and reference for the innovation of the development technology of soil enzyme research.

Keywords

Bibliometrics, Knowledge Domain, Soil Enzymes, Research Focus

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

[研究意义]土壤酶来源于土壤微生物、植物根系分泌、动植物残体分解,是能改变土壤生化反应速率[1],催化土壤有机质分解功能的特殊蛋白质[2],它参与了土壤中许多有关物质循环和能量流动的反应,对生态系统中养分循环具有重要的调控作用[3]。与土壤质地、pH等土壤理化性质相比,土壤酶对于气候变化、土地利用方式的改变、污染物等引起的土壤环境变化能够做出迅速的反应[4],在指示生态系统恶化的同时也能反映生态系统功能的恢复情况,以及不同的修复方法材料在不同土壤间的差异。因此,把握好土壤酶的影响因子、调控机理,对维持土壤质量和生态环境健康发展具有重要意义。

[前人研究进展]当前,土壤酶研究内容丰富涉及领域广,但少有文献从科学知识图谱的视角,对土壤酶研究热点和未来发展趋势进行深入剖析,[研究切入点]相对于传统的文献综述方法,以大量文献数据为基础的文献计量法能快速、准确地进行定量分析,表达更科学直观[5],能解决文献数据量庞大、无法快速有效阅读的问题。为全面了解我国土壤酶研究热点和未来变化趋势,本文利用CiteSpace软件以中国知网学术期刊数据库收录的土壤酶研究最近10年的相关文献作为数据源,[拟解决的关键问题]采用可视化分析软件进行科学计量分析和可视化图谱绘制,以便相关学者能更好地了解该领域的研究状况,以期为今后识别和开拓新的土壤酶研究方向提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 数据来源

以CNKI中国学术期刊数据库为检索来源,检索主题:“土壤酶”,时间限定为:2013~2022年;以Refworks格式导出文献,剔除重复、会议论文以及与研究主题和检索式不符合的文献,共得到有效文献3674篇。

2.2. 分析方法

使用CiteSpace进行计量分析,时间范围2013~2022年,时间切片为1年,词语来源同时选择

“Abstract”、“Title”、“Descriptors”、“Identifiers”，数据抽取 Top50 (一年中前 50 个高频出现节点)，对 “Institution”、“Author”、“Keyword” 三个节点进行计量分析，同时运用 Origin 和 Excel 软件对年发文量、发文机构和发文作者等进行统计与图表绘制。

3. 土壤酶领域的中文文献计量分析

3.1. 发文量分析

年度发文量反映其近年的学术关注程度，通过对检索所得文献进行分析(图 1)，2013~2022 年十年共收录相关文章 3674 篇，10 年来发文量保持平稳增长，尽管 17 年论文发文量有所下降，但土壤酶研究领域总体热度并没有降低。

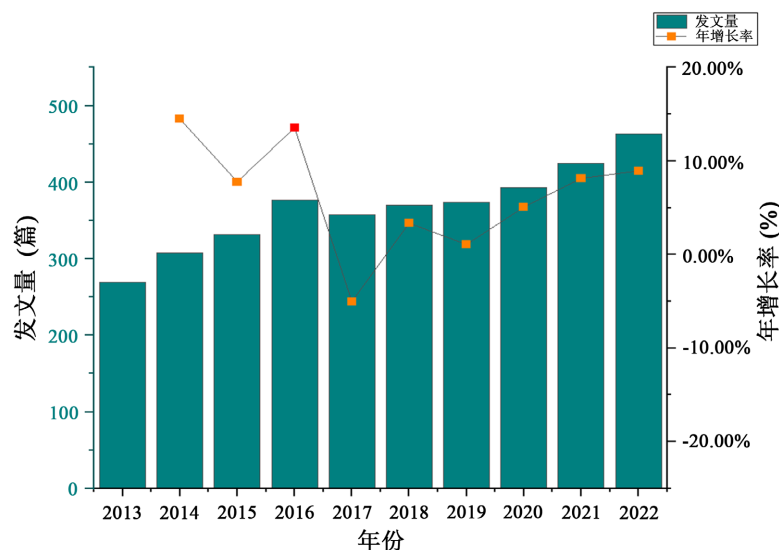


Figure 1. Annual distribution map of soil enzymes in Chinese literature

图 1. 土壤酶中文文献篇数年度分布图

3.2. 发文机构分析

为统一发文机构层次，将高校的下属单位统一到高校范畴，把分析出现的东北农业大学资源与环境学院，东北农业大学农学院等都统一划归为东北农业大学。其中发文量最多的机构是中国科学院和西北农林科技大学(表 1)，他们是土壤酶研究领域的中坚力量。除此之外，南京农业大学、山东农业大学、福建农林大学等也彰显了较高的学术研究水平。从图谱分析来看，连线分布较为稀疏(图 2)，合作网络密度小($N = 429$, $Density = 0.0037$)，可以看出各科研机构间的合作不多，未来研究还需进一步加强合作力度促进资源互补。

Table 1. Soil enzyme research main institutions and published volume

表 1. 土壤酶研究主要机构及发文量

序号	发文机构	发文量
1	中国科学院	325
2	西北农林科技大学	250
3	宁夏大学	95
4	山东农业大学	77

Continued

5	东北农业大学	74
6	东北农业大学	74
7	南京农业大学	59
8	四川农业大学	50
9	福建农林大学	47
10	云南农业大学	47

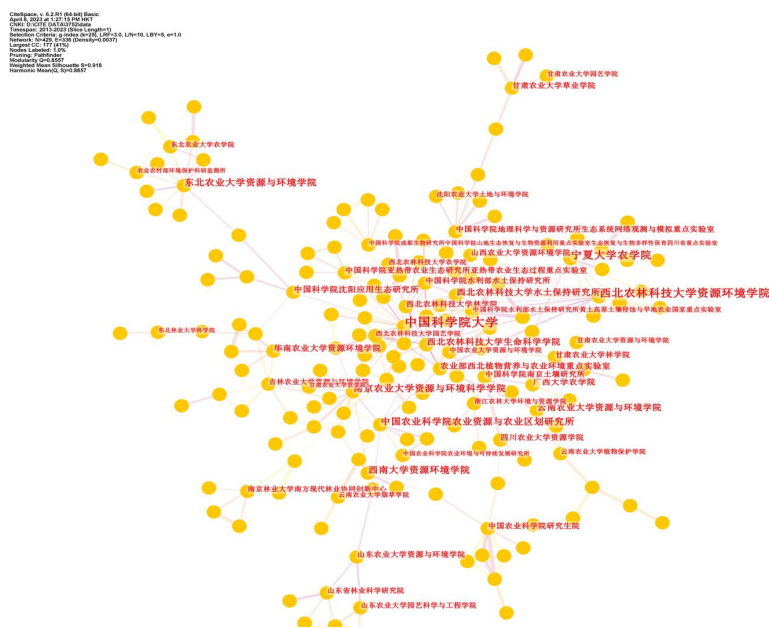


Figure 2. Atlas of co-occurrence
图 2. 土壤酶研究机构共现图谱

3.3. 核心作者分析

核心研究者在许多时候会引领该领域的学术研究发展方向[6]。对核心发文作者进行共现图谱分析(图 3), 同一机构组织成员核心作者之间合作密切, 但各机构间整体合作关系相对松散(Density = 0.0031)。从发文量来看 2013~2022 年土壤酶研究中文发文量最多的作者是毛志泉(32 篇)、陈学森(26 篇)、沈向(22 篇), 其中高产凸显作者以毛志泉为核心的科研团队, 把冻融作用和微生物土壤酶活性联系起来, 冻融过程会加速有机质的硝化和矿化效率[7], 增加土壤中养分含量, 土壤微生物群落结构得到优化, 为解决老龄果园连作障碍提供了新思路[8]。其他方面, 西北农林科技大学和文祥研究团队, 以土壤酶为切入点开展了不同施肥措施对黄土高原土壤理化性质影响研究, 施氮和添加绿肥对土壤酶活性具有较强的交互作用, 种植和翻压绿肥显著提高了土壤有机质、碱解氮和速效磷含量[9], 为黄土高原旱区选择最适绿肥品种和施氮方式、推广使用绿肥、改善土壤等提供重要的参考。

4. 研究热点及前沿趋势

4.1. 关键词共现

关键词是对文章主题的高度提炼和总结, 中心性则代表了它在整个共现网络中的影响力[10]。对关键

词进行共现分析(图 4), 得到 513 个节点, 1343 条连线, 图中的节点代表关键词, 相关论文数越多, 外圈越大, 中心性越大外圈越厚[6]。剔除“土壤”和“土壤酶”等与检索主题词相同的关键词, 结合高中心性、高频次关键词、高被引用文献(表 2), 发现土壤微酶研究范围主要包括酶活性、土壤养分、连作、秸秆还田、有机肥、根际土壤等。研究热点主要为探讨不同农事措施下土壤酶与土壤质地、养分、微生物的关系, 解决农业生产问题(表 3)。

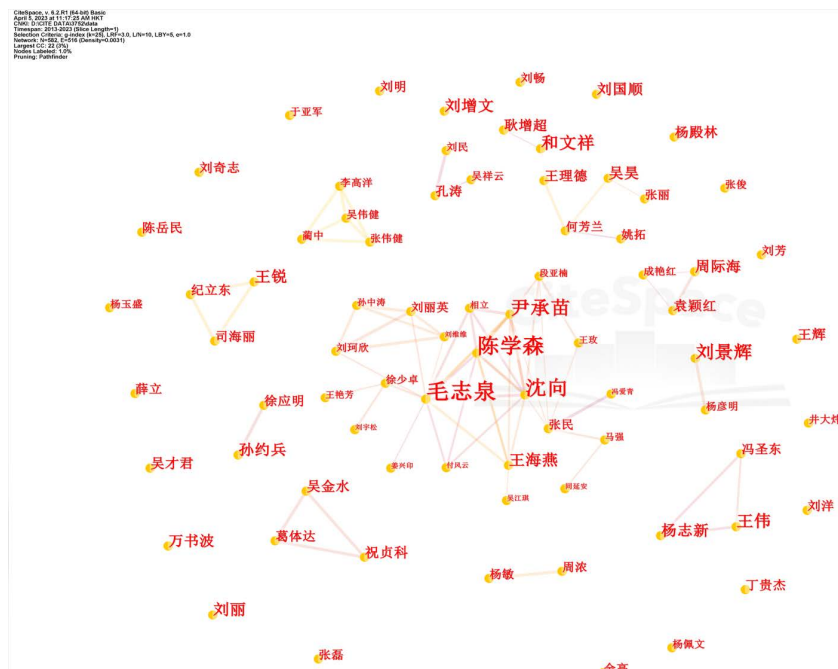


Figure 3. Soil enzyme research author collaborative atlas
图 3. 土壤酶研究作者合作图谱



Figure 4. Study of co-occurrence map of keywords in soil enzymes
图 4. 土壤酶研究关键词共现图谱

Table 2. The top 5 soil enzyme-related studies are highly cited in the literature**表 2.** 土壤酶相关研究前 5 位高被引用文献

序号	文章题目	发表期刊	发表年份	引用次数
1	有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展	生态环境学	2016	447
2	土壤酶学研究进展	土壤	2016	386
3	有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响	生态学	2014	374
4	有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响	植物营养与肥料学	2014	320
5	耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响	应用生态学	2015	311

Table 3. High frequency and high school mental keywords in soil microbial research**表 3.** 土壤微生物研究高频及高中心性关键词

序号	关键词	频次
1	土壤养分	435
2	酶活性	569
3	土壤肥力	132
4	微生物	106
5	根际土壤	83
6	生物炭	103
7	连作	93
8	连作障碍	100
9	有机肥	84
10	秸秆还田	97

4.2. 研究前沿分析

研究前沿是一个研究领域中最新、最具有发展前景的研究课题。土壤酶突现词共现时间线视图显示(图 5) $Q = 0.304$, $S = 0.614$, 视图聚类效果良好, 可以直观反映出某领域在不同时间的研究前沿及其衍生关系, 可合理预测今后的发展趋势进行。

类聚类 0, 聚类 1 土壤肥力与品质贯穿整个时间线, 聚焦土壤酶与土壤养分、产量、品质的联系, 土壤酶能促进土壤养分循环, 提高养分的转化利用效率, 而有机肥能够补充土壤养分改善土壤的微生物环境提高土壤酶活性[11], 目前针对有机肥种类性质, 施用方式已经有了很多研究, 下一步研究应侧重不同土壤及酶对有机肥的响应。

聚类 5 适量的氮沉降能促进植物生长, 更大程度的利用氮素, 但在氮素充足的地区氮沉降则会对植物生长会产生负面影响[12], 我国大部分地区位于北温带, 与热带地区相比持续的 N 沉降反而会引起 P 限制[13], 不易使土壤 N 饱和[14]。土壤磷循环并非是单独进行, 而是与碳、氮等元素循环相互耦合, 氮

沉降导致生态系统的 C、N、P 化学计量比波动, 以及各过程对这些变化的响应成为探索的重点。

聚类 6 聚类 11 这两类聚类主要关注改善土壤理化性质和微生物群落, 现代种植业由于集约化程度大复种指数高, 导致了土壤酶活性下降[15]、肥力降低、病害加重等问题。不同作物抑制病原菌有差异, 单一种类甚至多种施用拮抗细菌很难彻底消除连作障碍[16]。对土壤微生物具有高效杀灭效果熏蒸法广泛用于缓解连作障碍[17], 但熏蒸剂多数为广谱熏蒸剂, 存在毒性强, 成本高、持续时间短降解不确定等问题[18], 开发清洁环保的熏蒸剂代替传统化学熏蒸, 借助基因组学分析和分子育种, 筛选抗性品种, 将是攻克这一难题的方向[19]。

聚类 7 秸秆作为一种可再生资源为农业生产提供了诸多帮助, 但在秸秆腐解过程中会产生化感类自毒物质, 导致病虫害加重、后茬作物种子发芽率低等新问题[20], 目前大部分研究利用植株体浸提液, 仅能了解产生化感物质对土壤酶共同效应, 未来需单独细分每一种化感物质作用, 正确评估其环境效应。

聚类 8 土壤酶对温度、湿度、pH 等环境因子变化反应灵敏[21], 把土壤酶活性的变化作为指标, 指示生态系统功能的恢复和生态系统恶化情况, 同时反映修复不同方法材料在不同土壤的相互作用对土壤微生物及酶的影响。但环境因子很少单独起作用, 或是任意二者嵌套处理都不能全面准确地反映出环境变化对土壤酶的真实影响。今后有必要对全球多因素的耦合效应进行系统性的综合研究。

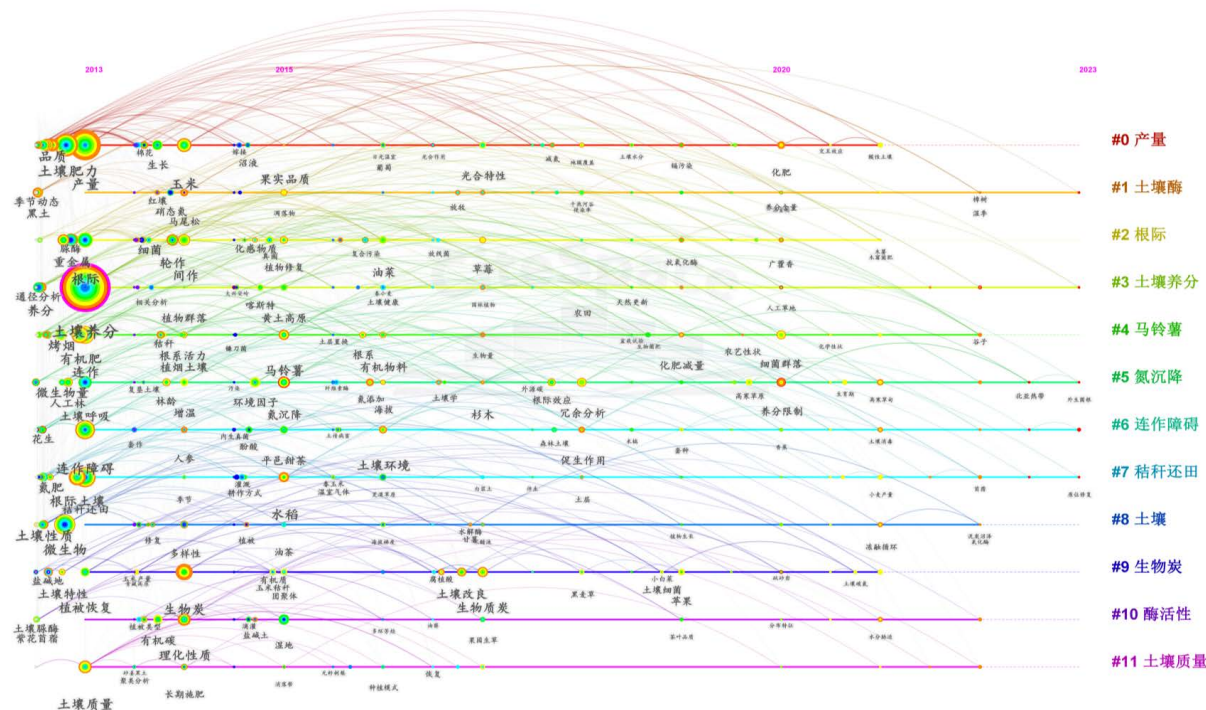


Figure 5. Timeline map of the emerging words

图 5. 突现词时间线图谱

突现值的大小代表着其研究方向的重要性[22], 探测算法可以预测某研究领域方向(图 6)。

突现值最大的关键词为“间作”, 突现值为 3.45, 可以认为间作是 2018 年以来热门关注和探讨的课题, 在日益加剧的全球变暖大背景下寻求一种高效环保的种植模式, 减少土壤温室气体排放受到了广泛关注, 合理间作能够提高土壤有机碳(SOC)含量, 降低矿化率, 减少 CO₂ 排放[23]。土壤理化性质只是通过影响微生态环境, 间接改变微生物的作用, 接下来应从分子层面探究不同微生物功能基因结构、种类、多样性与温室气体排放的关联, 摸清间作土壤调控微生物温室气体排放机理。

由于蛋白质构象的差异, 高海拔地区土壤胞外酶存在“冷适应”的现象[24], 一些土壤酶在低温下仍能保持较高活性, 但对温度变化更加敏感[25]。而也有研究发现在大部分高海拔地区昼夜温差大, 可能导致土壤胞外酶适应的温度范围扩大, 对温度变化反而变得迟钝[26]。假设在低温区间土壤酶敏感性更高是普遍存在, 那么气候变化导致的土壤小幅度增温, 很可能会使相关的土壤生物化学过程放大, 未来新思路可能聚焦土壤酶在低温和其他环境因子交互条件的协同适应能力。

生物炭常用来解决土壤退化酶活性丧失等问题[27], 然而生物炭可溶性组分[28] (溶解性有机质、多环芳烃、重金属等)能与土壤发生迁移[29], 但其对土壤酶的影响尚不清楚, 可借助环境毒理学手段对生物炭中溶组分进行定性分析, 深入剖析不同组分对酶活性影响及其机理, 系统评估生物组分炭在改良土壤过程存在的潜在风险。

Top 14 Keywords with the Strongest Citation Bursts



Figure 6. Distribution map of emergent words in soil enzyme studies

图 6. 土壤酶研究突现词分布图谱

5. 结论与展望

当前土壤酶研究方向不断改变, 研究对象呈现多元化, 涉及土壤理化性质、微生物特性、全球气候。近 10 年土壤酶研究集中在土壤酶参与碳氮养分循环、有机质分解、对受污染土壤的修复、及植物-微生物相互作用, 改善土壤微生态解决农业生产等问题。除了在机理上探究土壤酶的来源和功能, 还应提高土壤酶的提取和检测相关技术水平, 使检测的简单化、快速化、低成本, 可以直接利用其治理污染土地, 提高土壤质量等。

本文也存在一定的局限性, 首先受限于数据库资源, 仅借助 CNKI 学术期刊数据库, 难免造成相关文献遗漏, 统计结果不准确。后续会加入 Web of Science 核心数据库, 提供更全面详尽的文献资料。

参考文献

- [1] Sinsabaugh, R.L., Lauber, C.L., Weintraub, M.N., *et al.* (2008) Stoichiometry of Soil Enzyme Activity at Global Scale. *Ecology Letters*, **11**, 1252-1264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>

- [2] 张志丹, 赵兰坡. 土壤酶在土壤有机培肥研究中的意义[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 362-368. <https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2006.02.035>
- [3] 安韶山, 黄懿梅, 刘梦云. 宁南山区土壤酶活性特征及其与肥力因子的关系[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 55-58.
- [4] Caldwell, B.A. (2005) Enzyme Activities as a Component of Soil Biodiversity: A Review. *Pedobiologia*, **49**, 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>
- [5] 牛善栋, 吕晓, 李振波. 中国耕地集约利用研究的文献计量分析[J]. 土壤, 2016, 48(2): 306-313. <https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2016.02.015>
- [6] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [7] Henry, H.A.L. (2007) Soil Freeze-Thaw Cycle Experiments: Trends, Methodological Weaknesses and Suggested Improvements. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**, 977-986. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.11.017>
- [8] 段亚楠, 刘恩太, 陈学森, 等. 冻融对老龄苹果园土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2021, 53(1): 125-132. <https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2021.01.017>
- [9] 彭映平, 和文祥, 王紫泉, 等. 黄土高原旱区绿肥定位试验土壤化学性质及酶活性特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 131-138, 149. <https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.09.019>
- [10] Li, J. and Chen, C.M. (2017) Cite Space: Text Mining and Scientific Literature. Capital University of Economics and Business Press, Beijing.
- [11] 闫丽娟, 王海燕, 李广, 吴江琪. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 190-196, 204.
- [12] 段娜, 李清河, 多普增, 汪季. 植物响应大气氮沉降研究进展[J]. 世界林业研究, 2019, 32(4): 6-11.
- [13] Dong, C.C., Wang, W., Liu, H.Y., Xu, X.T. and Zeng, H. (2019) Temperate Grassland Shifted from Nitrogen Toposphorus Limitation Induced by Degradation and Nitrogen Deposition: Evidence from Soil Extracellular Enzyme Stoichiometry. *Ecological Indicators*, **101**, 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.046>
- [14] Lebauer, D. and Treseder, K.K. (2008) Nitrogen Limitation of Net Primary Productivity in Terrestrial Ecosystems Is Globally Distributed. *Ecology*, **89**, 371-379. <https://doi.org/10.1890/06-2057.1>
- [15] 董艳, 鲁耀, 董坤, 等. 轮作模式对设施土壤微生物区系和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 53-55.
- [16] Berendsen, R.L., Vismans, G., Yu, K., Song, Y., de Jonge, R., Burgman, W.P., Burmølle, M., Herschend, J., Bakker, P.A.H.M. and Pieters, C.M.J. (2018) Disease-Induced Assemblage of a Plant-Beneficial Bacterial Consortium. *The ISME Journal*, **12**, 1496-1507. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0093-1>
- [17] 刘恩太, 李园园, 胡艳丽, 孙传香, 毛志泉. 棉隆对苹果连作土壤微生物及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 847-852.
- [18] 尹承苗, 王玫, 王嘉艳, 陈学森, 沈向, 张民, 毛志泉. 苹果连作障碍研究进展[J]. 园艺学报, 2017, 44(11): 2215-2230.
- [19] 范振权, 刘文东, 王文博, 等. 苹果连作障碍研究进展与展望[J]. 烟台果树, 2023(2): 1-4.
- [20] 和文祥, 李天伦, 田霄鸿, 等. 基于土壤酶的酚酸类化感物质效应研究[J]. 西北农业学报, 2015, 24(6): 147-154.
- [21] Duan, C.J., Fang, L.C., Yang, C.L., et al. (2018) Reveal the Response of Enzyme Activities to Heavy Metals through *in situ* Zymo Graphy. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **156**, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.015>
- [22] 曹梦, 李勇, 勾宇轩, 等. 基于知识图谱的土壤中抗生素研究进展分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 627-635.
- [23] 唐艺玲, 王建武, 杨文亭. 间作对旱地 CO₂ 和 N₂O 排放影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1323-1330. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201604.033>
- [24] Hochachka, P.W. and Somero, G.N. (2002) Biochemical Adaptation: Mechanism and Process in Physiological Evolution. Oxford University Press, New York.
- [25] Koch, O., Tscherko, D. and Kandeler, E. (2007) Temperature Sensitivity of Microbial Respiration, Nitrogen Mineralization, and Potential Soil Enzyme Activities in Organic Alpine Soils. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**, GB4017. <https://doi.org/10.1029/2007GB002983>
- [26] Blagodatskaya, E., Blagodatsky, S., Khomyakov, N., Myachina, O. and Kuzyakov, Y. (2016) Temperature Sensitivity and Enzymatic Mechanisms of Soil Organic Matter Decomposition Along an Altitudinal Gradient on Mount Kilimanjaro. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 22240. <https://doi.org/10.1038/srep22240>

- [27] 孙文泰, 马明, 董铁, 等. 长期覆膜旱地苹果园表层土壤“隐性”退化下活性有机碳与酶活性差异[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 272-279. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2021.05.037>
- [28] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 146.
- [29] Qiu, M., Sun, K., Jin, J., *et al.* (2015) Metal/Metalloid Elements and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Various Biochars: The Effect of Feedstock, Temperature, Minerals, and Properties. *Environmental Pollution*, **206**, 298-305. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.026>