

# 基于 CiteSpace 的磷转化微生物研究文献计量和可视化分析

高川宇, 李春越\*, 李艺凡, 李千雪, 寇钊阳, 张文婷

陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119

高川宇, 李春越, 李艺凡, 李千雪, 寇钊阳, 张文婷. 基于 CiteSpace 的磷转化微生物研究文献计量和可视化分析[J]. 微生物学通报, 2023, 50(11): 5235-5248.

GAO Chuanyu, LI Chunyue, LI Yifan, LI Qianxue, KOU Zhaoyang, ZHANG Wenting. Bibliometric and visual analysis of phosphorus-transforming microorganisms based on CiteSpace[J]. Microbiology China, 2023, 50(11): 5235-5248.

**摘要:** 【背景】磷转化微生物对于自然环境中的磷循环具有重要作用。此类微生物通过对环境中磷素的溶解矿化和吸收转运等作用促进资源高效利用, 减少环境污染, 对粮食安全和生态系统稳定也具有积极的影响。【目的】探究近年来国内外关于磷转化微生物的发展热点及趋势, 展示该领域的知识结构和知识演化过程, 为后续研究提供可行性的参考和启示。【方法】应用 CiteSpace 可视化软件对 2002–2022 年发表在中国知网(CNKI)和 Web of Science (WOS)数据库中的文献通过关键词共现分析、关键词聚类分析、关键词突现分析、发文数量分析、国家分布、作者合作共现及机构合作共现等方式对磷转化微生物的研究现状及新兴趋势进行分析。【结果】最终共筛选出 887 篇有效文献。磷转化微生物研究在 2016 年后开始蓬勃发展, 近几年增速加快; 中国和美国学者是此领域重要的研究力量; 中国是发文量最多的国家, 中国科学院是发文量最多的机构; 热门的研究领域为菌株的分类与筛选、代谢途径、营养元素循环以及环境污染与生态保护。【结论】磷转化微生物具有广阔的发展前景。目前, 生物炭及磷转化微生物的响应机制正在成为新的研究热点。此类技术在未来的广泛应用是必然的发展方向。本文以可视化的方式阐释了磷转化微生物研究发展态势, 提出了未来重点研究方向, 为农业生产与可持续发展提供了重要的理论基础。

**关键词:** 磷转化微生物; 磷循环; CiteSpace; 可视化分析; 研究热点

资助项目: 陕西省科技重点项目(2022NY-074); 国家自然科学基金(41501255); 西安市科技农业攻关项目(21NYYF0033); 中央高校基本科研业务费项目(SYJS202224)

This work was supported by the Key Project of Science and Technology of Shaanxi Province (2022NY-074), the National Natural Science Foundation of China (41501255), the Key Project of Xi'an Science and Technology and Agriculture (21NYYF0033), and the Basic Research Funds for Central Universities (SYJS202224).

\*Corresponding author. E-mail: chunyue\_li@snnu.edu.cn

Received: 2023-03-26; Accepted: 2023-05-06; Published online: 2023-06-02

# Bibliometric and visual analysis of phosphorus-transforming microorganisms based on CiteSpace

GAO Chuanyu, LI Chunyue<sup>\*</sup>, LI Yifan, LI Qianxue, KOU Zhaoyang, ZHANG Wenting

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China

**Abstract:** [Background] Phosphorus-transforming microorganisms play an important role in the phosphorus cycle in the natural environment. These microorganisms promote the efficient resource utilization, reduce environmental pollution, and have positive impacts on food security and ecosystem stability by dissolving, mineralizing, absorbing, and transporting phosphorus in the environment. [Objective] To explore the research hotspots and trends of phosphorus-transforming microorganisms both domestically and internationally in recent years, visualize the knowledge structure and evolution process in this field, and provide feasible references and insights for subsequent research. [Methods] We retrieved the articles in this field published by China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science core collection (WOS) from 2002 to 2022. CiteSpace was employed to analyze the keyword co-occurrence, keyword clustering, bursts, number of publications, country distribution, author cooperation, and institution collaboration. [Results] A total of 887 valid articles were ultimately screened out. The research on phosphorus-transforming microorganisms began to flourish after 2016 and experienced accelerated growth in recent years. China and the United States were leaders in this field. China was the country with the largest number of publications, and the Chinese Academy of Sciences was the institution with the largest number of publications. The research hotspots included the classification and screening of strains, metabolic pathways, nutrient cycling, environmental pollution, and ecological protection. [Conclusion] Phosphorus-transforming microorganisms have broad development prospects. The mechanism of phosphorus-transforming microorganisms in response to biochar is becoming a new research hotspot. The wide application of such technologies in the future is an inevitable development trend. This article provides a visual explanation of the research and development trend of phosphorus-transforming microorganisms, proposes future key research directions, and provides a theoretical basis for agricultural production and sustainable development.

**Keywords:** phosphorus-transforming microorganisms; phosphorus cycling; CiteSpace; visual analysis; research hotspots

磷转化微生物是一类能够利用无机磷酸盐将其转化为有机磷形式从而满足自身生长及代谢需求的微生物<sup>[1]</sup>。这些微生物广泛存在于土壤、水体等自然环境中，在生态系统中发挥着重要的作用。常见的磷转化微生物有硝酸溶解

菌、磷酸钾溶解菌、磷酸酯酶产生菌、磷酸矿化菌等<sup>[2]</sup>。在污水处理中，使用磷转化微生物是一种高效的手段。微生物除磷过程中产生的污泥通过进一步处理可以得到有机肥料等回收产品。因此，磷转化微生物在污水处理中的应

用具有良好的经济、环境和社会效益<sup>[3-4]</sup>。在农业生产中, 磷转化微生物可以促进有机物质的分解, 释放无机磷供植物吸收和利用, 这个过程可以提高土壤的肥力和植物的生长<sup>[5]</sup>。例如, 在巴西进行的一项研究表明, 与对照植物相比, 用溶磷细菌接种大豆种子可使谷物产量增加 33%<sup>[6]</sup>。总而言之, 磷转化微生物在环境污染方面起着至关重要的作用, 对于保护环境和维护生态平衡具有重要意义<sup>[7]</sup>。

本文将融合文献计量学和可视化技术, 对二十年来磷转化微生物的研究成果进行全面、系统地分析。检索涉及磷转化微生物的研究文献, 收集整合了 2002 年 1 月至 2022 年 12 月在中国知网(China national knowledge infrastructure, CNKI)和 Web of Science (WOS)数据库中收录的有关磷转化微生物方向的文献, 并使用 CiteSpace 软件对文献之间的合作关系、主题演化、研究热点等进行分析和可视化展示, 旨在深入挖掘和分析磷转化微生物领域的研究成果, 为该领域的研究者提供另一种角度的参考, 借此推动该领域更加系统、深入的研究。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源

CNKI 和 WOS 数据库是本文全部中英文文献使用的检索平台。时间跨度均为 2002 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日。CNKI 数据库检索条件: (主题=“磷转化微生物” OR “溶磷” OR “解磷” AND “基因”), 共检索出 598 篇与磷转化微生物相关的文献。排除与主题不符的文献、科普、会议论文、摘要及编辑资料的文献, 最终搜索结果为 333 篇。WOS 数据库检索条件: (Topic=“transformation of phosphorus” OR “microorganism dephosphorization” AND

“microbe”), 将出版语言设置为“English”, 共检索出 853 篇与磷转化微生物相关的文献。人工剔除不相关的文献后得到有效文献 554 篇。所有文献均以 TXT 格式文件的形式下载, 将数据文件以“download\_”作为文件名前缀。

### 1.2 研究方法

为确保选取文献与主题的相关性, 使用人工的方式剔除无关文献。建立“input”“output”“data”和“project”这 4 个文件夹。打开 CiteSpace 后将时间分区(time slicing)设置为 2002–2022 年, 时间切片(time slice)设置为 1 年, 节点类型(node types)分别依次选择作者(author)、机构(institution)、国家(country)、关键词(keywords), 剪切方式(pruning)采用 sliced networks<sup>[8]</sup>。本文可视化分析基于 CiteSpace (6.1.R6 版), 数据分析在 Microsoft Excel 2013 中进行, 相关图形用 Origin 9.1 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文数量分析

为了解磷转化微生物领域的发展态势, 本文对发文量随时间的变化趋势进行了可视化研究。如图 1 所示, 2002–2022 年间国内外关于此领域的研究整体呈上升趋势。英文文献的发表大致可分为 2002–2015 和 2016–2022 这 2 个阶段: 第 1 阶段为磷转化微生物发展研究的初级阶段, WOS 数据库每年的发文量在 20 篇左右; 第 2 阶段发文量有了明显的上升, 2021 年发文量高达 82 篇。CNKI 收录的相关文献数量增长缓慢, 总体呈上升趋势。2014 年后每年的发文量维持在 20 篇以上。分析结果表明国内外该领域起步较晚, 但近几年热度较高, 发文量稳步增长。2016 年后国外文章发文量增幅较大, 说明研究者们对于此方向有着浓厚的兴趣, 具有发展潜力和广阔的研究前景。

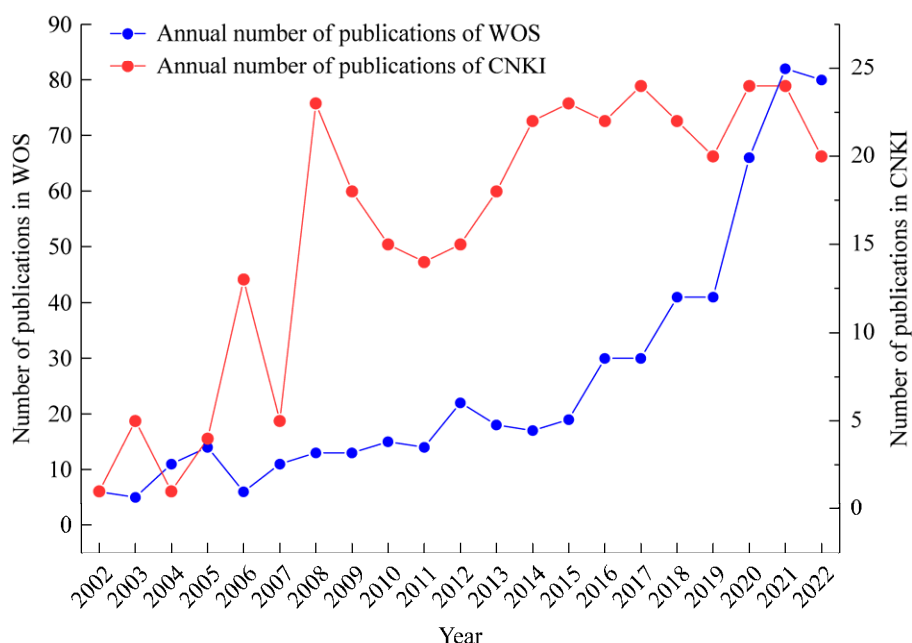


图1 CNKI和WOS发文数量随时间变化趋势图

Figure 1 Annual number of publications in the CNKI and WOS database.

## 2.2 机构分析

经统计,CNKI数据库中发文机构合作图谱共有节点318个,连线181条。机构合作图谱中网络密度为0.0036(图2A)。其中南京农业大学(Nanjing Agricultural University)、西北农林科技大学(Northwest A&F University)和甘肃农业大学对该领域的研究最多,发文量均为9篇;而在WOS数据库中,机构合作图谱共有节点409个,连线576条(图2B)。在所有机构中,中国科学院(Chinese Academy of Sciences)和中国科学院大学(University of Chinese Academy of Sciences)是此领域最主要的发文机构,其中中国科学院发文70篇,中国科学院大学发文37篇。大部分研究机构的中介中心性都小于0.1,说明大部分机构之间合作不多,研究方向不同导致研究力量分散;而中国科学院的中心性为0.22,与国内外科研机构合作交流密切,不仅发文量最多,而且其文章具有较大的学术价值,研究成果在国际上有较大影响力。

## 2.3 国家分布

如图3所示,国家合作网络图中共有66个节点和227条连线。66个节点代表截至2022年12月已经有66个国家对磷转化微生物进行过研究。节点所代表国家的形状越大,来自相应国家的文章影响力和发文数量就越多。国家间的联系代表了它们之间的合作。节点中介中心性越高,传播影响力越大。一般而言,当节点的中介中心性 $\geq 0.1$ 时,该节点可被定义为关键节点<sup>[9]</sup>。其中,中国、美国、加拿大、澳大利亚和德国发文量分别为250、140、46、40和38篇,位列前五。中国、美国、加拿大、澳大利亚、德国和英国均为关键节点,其中介中心性分别为0.42、0.33、0.19、0.23、0.29和0.15。中国在此领域的发文量和中介中心性均是第一,说明其在合作网络中起到了关键的桥梁作用。这种清晰的可视化图谱有助于进一步了解世界各国对磷转化微生物领域的重大贡献。

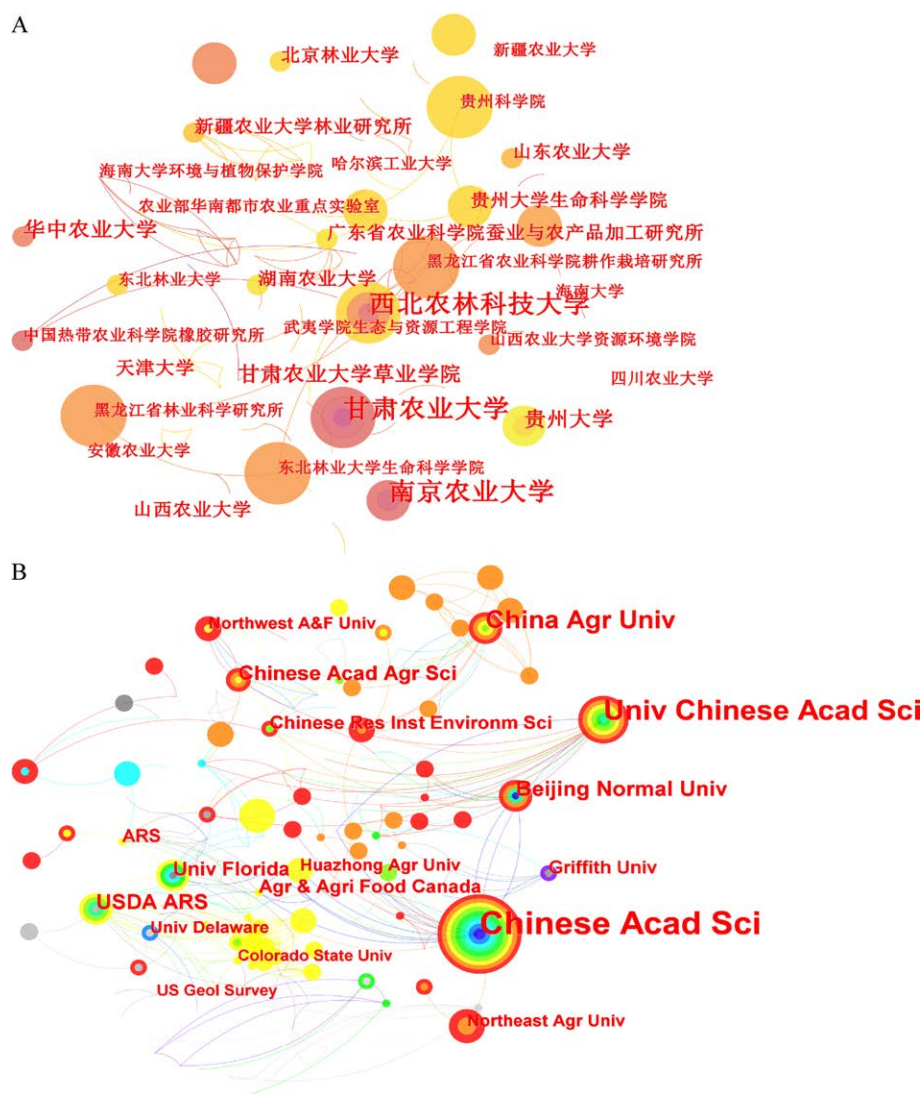


图 2 发文机构合作图 A: CNKI 机构合作图. B: WOS 机构合作图

Figure 2 Cooperation map of issuing institutions. A: CNKI institutional cooperation map. B: WOS institutional cooperation map.

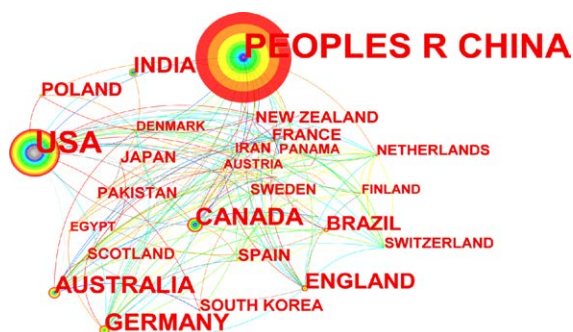


图 3 国家合作网络图

Figure 3 Network map of national cooperation.

## 2.4 作者分析

节点代表发文作者, 节点的大小代表作者发文量的多少; 节点的不同颜色代表作者研究的不同方向; 连线代表作者之间的合作关系, 连线越粗代表作者之间合作关系越强<sup>[10]</sup>。由图 4A 可知, CNKI 作者合作图谱共有节点 459 个、连线 539 条。国内对此领域的研究作者集中在黑龙江省农业科学院的李丽丽、来永才, 东北林业大学的郎敬、杨洪一、郜飞飞, 以及贵州大学



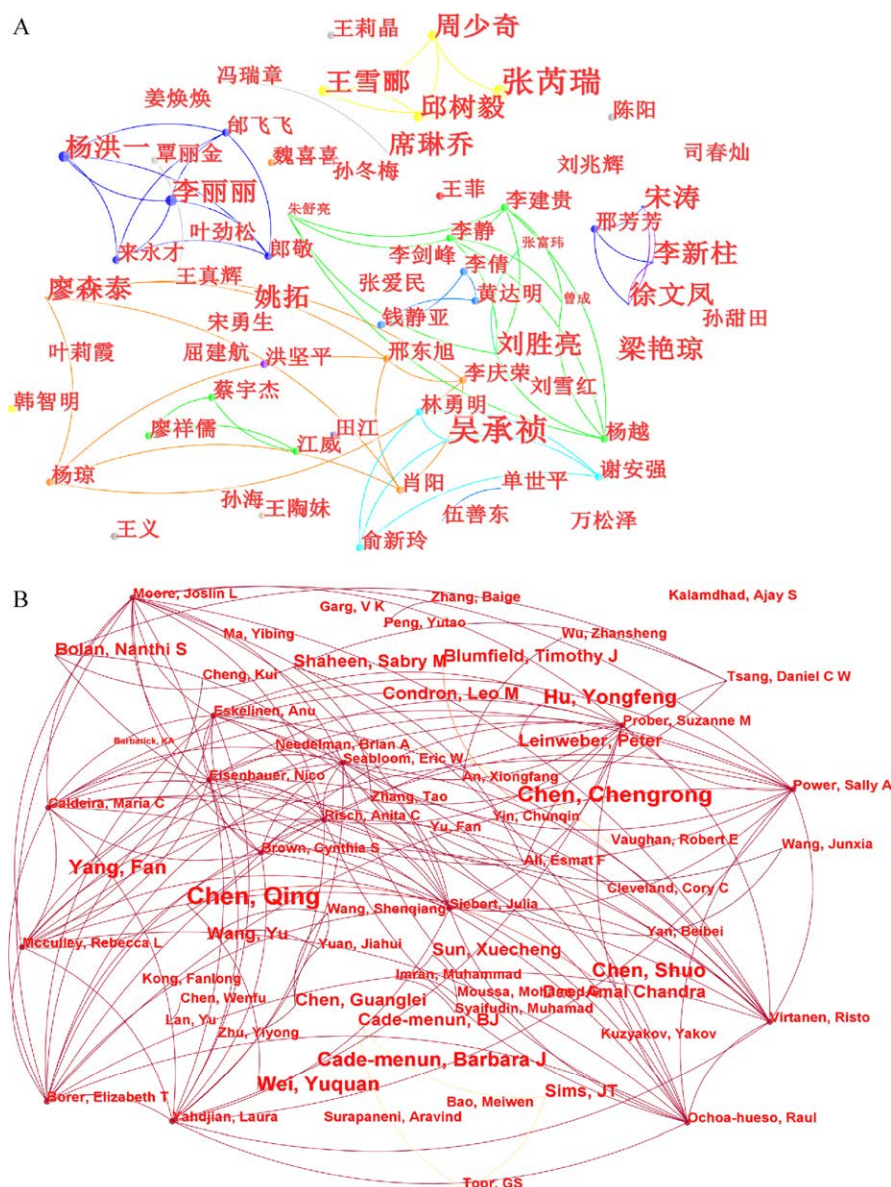


图 4 作者合作共现图 A: CNKI 作者合作共现图. B: WOS 作者合作共现图

Figure 4 Cooperation network of authors. A: Cooperation network of authors (CNKI). B: Cooperation network of authors (WOS).

的王雪邴、张芮瑞、周少奇、邱树毅等核心作者群。主要合作关系为团队内部合作。但各研究团队间相互引用较少，缺乏密切合作，说明其研究方向可能存在较大差异。WOS 数据库中作者合作图谱共有 573 个节点、644 条连线，网络密度为 0.003 9 (图 4B)。WOS 数据库数据显示，发文量最多的作者是 Chen Qing, Chen

Chengrong, 说明此领域的研究主要集中在国内,并在国际上产生了一定影响力。Sun Xuecheng 等中国学者与国外学者有一定交流合作。由图 4B 可见, Risc Anita C、Mcculley Rebecca L、Caldeira Maria C、Eskelinen, Anu、Brown Cynthia S、Siebert Julia 等之间连线线条较多,合作较为密切。除此之外, Chen Guanglei、Zhu

Yiyong、Yuan Jiahui、WangShenqiang 等也形成了一定的合作研究关系。目前, 各国的磷转化微生物研究人员大部分都专注于内部研究, 很少会组织机构与机构间的合作; 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, 研究力量更分散, 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磷转化微生物

的研究具有积极影响, 今后应该加强不同机构不同作者间的合作交流。

## 2.5 关键词共现分析

关键词作为能够代表文章主要内容的关键部分之一, 其出现的频次与研究成果的数量呈正相关关系<sup>[9]</sup>。利用 CiteSpace 生成 CNKI 和 WOS 数据库中磷转化微生物研究高频关键词共现图谱, 见图 5。图中的节点越大, 其代表的关键词共现频次越高, 节点与节点之间的连线越明显则表示两者之间联系越密切<sup>[11]</sup>。CNKI

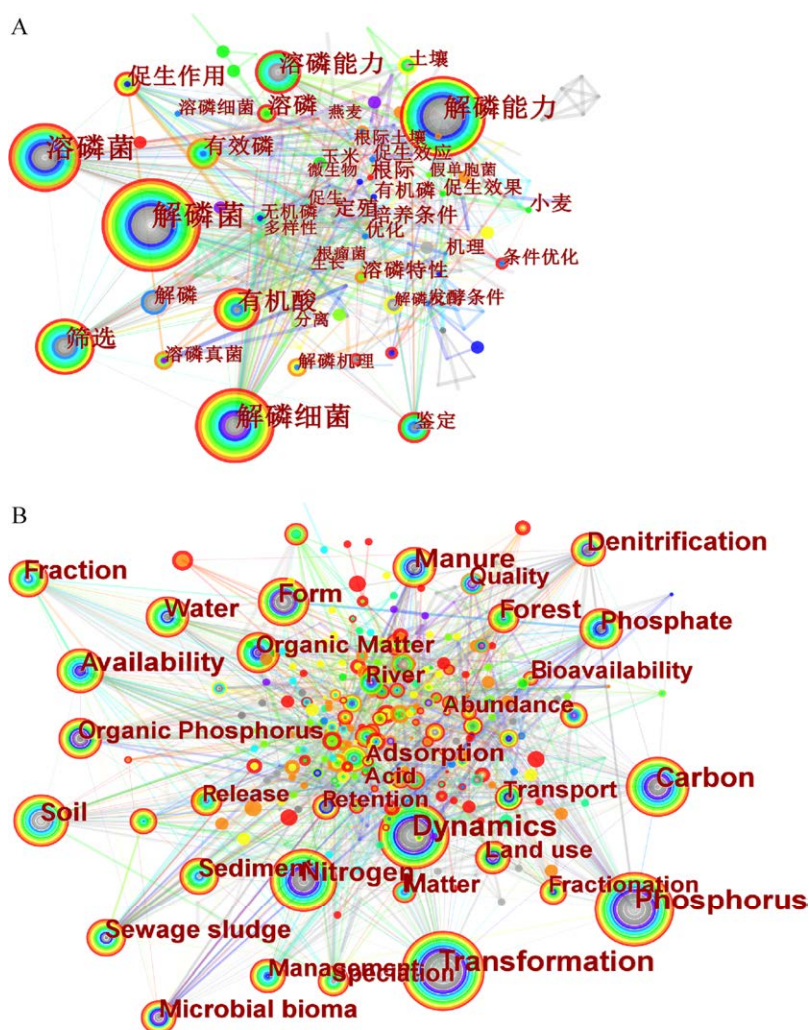


图 5 高频关键词共现图 A: CNKI 高频关键词共现图. B: WOS 高频关键词共现图

Figure 5 High-frequency keyword co-occurrence atlas. A: High-frequency keyword co-occurrence atlas of CNKI. B: High-frequency keyword co-occurrence atlas of WOS.





表 2 WOS 数据库关键词突现信息  
Table 2 Emergence of key words in WOS

关键词	突现强度	开始	结束	2002–2022
Keywords	Strength	Begin	End	
动态 Dynamics	4.89	2004	2013	-----
磷 Phosphorus	3.28	2004	2008	-----
动物粪便 Animal manure	3.68	2005	2009	-----
反硝化作用 Denitrification	3.36	2011	2013	-----
生态系统 Ecosystem	3.14	2011	2013	-----
河流 River	3.66	2013	2019	-----
系统 System	3.71	2015	2017	-----
土壤 Soil	3.14	2017	2018	-----
生物炭 Biochar	3.68	2018	2022	-----
机制 Mechanism	4.24	2020	2022	-----
响应 Response	3.82	2020	2022	-----

2.7 关键词聚类分析

关键词聚类分析是使用 CiteSpace 对提取的所有关键词进行分类，一般认为当聚类模块值( $Q$  值) $>0.3$  时就意味着聚类结构显著；当平均轮廓值( $S$  值) $>0.7$  时，聚类是高效率令人信服的，在 0.5 以上，聚类认为是合理的<sup>[14]</sup>。若  $S$  值为无穷大，则聚类数通常为 1，这样选择的网络可能太小，只能代表一个研究主题。将 CNKI 数据库生成的磷转化微生物关键词聚类

的主题信息导出后汇总，见图 6A 和表 3。这 12 个聚类其平均轮廓值分别为 0.893、0.881、0.816、0.859、0.800、0.948、0.818、0.930、0.811、0.734、0.995 和 0.974。

聚类#0、#1 涉及解磷菌的分类。“解磷菌”包含“解磷真菌”和“解磷细菌”。解磷真菌在数量上远不如解磷细菌多，其种类也少，主要局限于青霉(*Penicillium*)、曲霉(*Aspergillus*)、镰刀菌(*Fusarium*)、小丝核菌(*Sclerotium*)等几个属

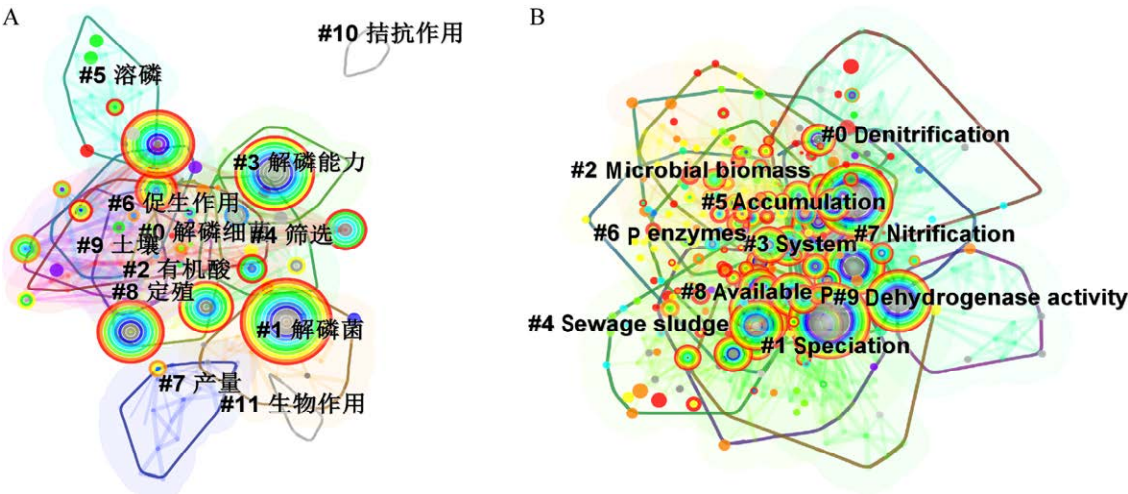


图 6 关键词聚类图 A: CNKI 关键词聚类图. B: WOS 关键词聚类图  
Figure 6 Keyword cluster diagram. A: Keyword cluster diagram of CNKI. B: Keyword cluster diagram of WOS.

表3 CNKI 数据库关键词聚类信息

Table 3 Database keyword clustering information in CNKI

聚类号 Cluster No.	CNKI 聚类标签 Cluster tags of CNKI	关键词数目 Number of keywords	平均轮廓值 Silhouette	平均年份 Mean year
0	解磷细菌 Phosphate-solubilizing bacteria	42	0.893	2014
1	解磷菌 phosphate-solubilizing microorganisms	37	0.881	2011
2	有机酸 Organic acid	32	0.816	2014
3	解磷能力 Phosphorus dissolving ability	27	0.859	2011
4	筛选 Screen	25	0.800	2010
5	溶磷 Phosphorus solubilization	24	0.948	2010
6	促生作用 Growth promoting effect	23	0.818	2014
7	产量 Output	22	0.930	2013
8	定殖 Colonization	21	0.811	2013
9	土壤 Soil	21	0.734	2013
10	拮抗作用 Antagonistic effect	5	0.995	2011
11	生物作用 Biological action	5	0.974	2014

种。解磷细菌有芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)、假单胞杆菌(*Pseudomonas* sp.)、欧文氏菌(*Erwinia* sp.)、土壤杆菌(*Agrobacterium* sp.)、沙雷氏菌(*Serratia* sp.)等<sup>[16]</sup>。聚类#2 强调了微生物代谢产物对植物的影响。有研究表明解磷菌的作用机制与其产生的有机酸有关<sup>[17]</sup>。王富民等通过对黑曲霉(*Aspergillus niger*)的研究发现,解磷菌通过发酵产生草酸等多种有机酸<sup>[18]</sup>,能够有效提高作物整体的产量和质量。聚类#3 着重于微生物解磷功效的研究,是磷转化微生物研究中的重要方向。聚类#4 和#8 关注的是如何获得大量目的菌株的问题。筛选是指在微生物分类和培养过程中,通过对不同微生物的特征和功能进行判断筛选出具有理想性状的微生物,并进行后续的开发和利用,是微生物试验中得到目的菌株的主要方法之一<sup>[19]</sup>。测定微生物解磷能力的常用方法有平板法、液体培养法和土壤培养法等<sup>[20]</sup>。定殖是指各种微生物从一种环境迁移到另一种环境(通常为动物体、植物体、人体),并在某一新环境或新地点生存、繁殖<sup>[21]</sup>。聚类#5、#6、#10 和#11 涉及微生物在生态系统中的作用,展示了微生物参与磷循环过程的不

同方式。聚类#7 与农业生产密切相关。产量与经济效益挂钩,也是判断一种微生物是否为磷转化微生物以及是否可以应用于农业生产的关键<sup>[22]</sup>;聚类#9 “土壤”是微生物的大本营,是筛选磷转化微生物的材料和源头<sup>[23]</sup>。然而微生物的活动也对土壤的结构和质量有着重要的影响<sup>[24]</sup>。随着近年来土壤污染问题的加剧,在今后的研究中应重点关注对环境的影响。

将 WOS 数据库生成的磷转化微生物关键词聚类的主题信息导出后汇总,见图 6B 和表 4。这 10 个聚类其平均轮廓值分别为 0.752、0.788、0.684、0.823、0.733、0.736、0.777、0.827、0.738 和 0.887。

聚类#0、#2、#3、#6 和#7 探讨了生态系统运转机制和功能维持的重要性。反硝化聚磷菌(denitrifying phosphate-accumulating bacteria, DPB)是一种在厌氧和缺氧交替进行的环境中驯化出的磷转化微生物,可以通过反硝化作用(denitrification)同时来完成污水的脱氮和除磷<sup>[25]</sup>,而硝化作用(nitrification)指的是氨基酸脱下的氨,在有氧条件下经硝化细菌作用转化为硝酸的过程<sup>[26]</sup>。这 2 个聚类反映出研究者对营养

表 4 WOS 数据库关键词聚类信息

Table 4 Keywords clustering information in WOS database

聚类号	WOS 聚类标签	关键词个数	平均轮廓值	平均年份
Cluster No.	Cluster tags of WOS	Number of keywords	Silhouette	Mean year
0	反硝化作用 Denitrification	71	0.752	2009
1	形态 Speciation	70	0.788	2008
2	微生物量 Microbial biomass	68	0.684	2014
3	系统 System	49	0.823	2011
4	污水污泥 Sewage sludge	47	0.733	2014
5	积累量 Accumulation	45	0.736	2015
6	磷酸酶 P enzymes	44	0.777	2015
7	硝化作用 Nitrification	36	0.827	2008
8	有效磷 Available P	35	0.738	2011
9	脱氢酶活性 Dehydrogenase activity	23	0.887	2008

元素循环的关注度较高。衡量土壤肥力的标准之一是土壤微生物量(microbial biomass),其数值高低受土壤生态环境和耕作制度的影响<sup>[27-28]</sup>。然而在生态系统中只有当有机磷矿化为无机磷才能被生物吸收利用<sup>[29]</sup>,磷酸酶(P enzymes)可以实现这一过程,在生物的循环代谢中起到重要的作用<sup>[30]</sup>。聚类#1 探讨了磷形态与磷转化微生物之间的关系。由于自然环境中大部分磷元素不能直接为植物或者微生物所利用,需要通过磷循环才能转化为可以被利用的形态。因此,对磷形态进行深入研究可以帮助人们更好地理解磷的生物循环过程,为农业生产和环境保护提供科学依据。聚类#4、#5 表明研究者们非常关注磷转化微生物对环境的影响以及由此产生的环境污染和生态保护问题。此外,废水处理和污泥处理等环境工程中对磷转化微生物的利用也是此领域的热点问题;聚类#8、#9 表明在提高土壤肥力和产量的同时可以通过评估土壤微生物群体的代谢水平来了解土壤状况以及种植适宜作物的可能性<sup>[31-32]</sup>。

### 3 讨论与结论

本研究采用 CiteSpace 对 CNKI 和 WOS 数据库中检索出的 887 篇文献进行分析,对磷转

化微生物的研究趋势进行了全面综述。通过一系列分析得出以下结论:国内外文献发表数量 2014 年以来逐年增加,2016 年以后增速明显加快,英文文献的发文量要多于中文文献。在磷转化微生物相关研究中,我国处于优势地位,发文数量和中心性位列第一,这得益于中国政府颁布的一系列助农政策以及对农业发展的大力支持;发文量与中心性最高的机构是中国科学院;美国与其他国家的合作最为紧密。合作图谱分析显示,磷转化微生物的研究热点集中在菌株的分类与筛选、代谢途径、营养元素循环、酶的功能特征、生态功能维持、环境影响和环境污染与生态保护等方面。生物炭与微生物代谢途径及其调控机制正在成为新的研究方向。尽管磷转化微生物具有广阔的发展前景,但现阶段的研究存在不足。例如,现有研究对磷转化微生物代谢转化网络及其对环境的响应机制了解有限。虽然已有研究初步揭示了磷转化微生物在某些条件下的行为与代谢机制,但其在实际生产中的可行性与效率尚未得到充分评估。在今后的研究中可采用系统生物学和代谢组学等新兴技术手段加强对微生物行为和代谢机理的研究,探索其潜在的应用价值。同时,加强技术标准的制定,以推广其应用。其次,

微生物群落结构对磷转化效率的影响尚未深入研究。对磷转化微生物在自然生境下的行为规律和生态适应性不够清楚。未来的研究可通过环境基因组学分析、代谢物分析、群落构建试验等生态学方法加强对微生物种群分布、种群动态及生存策略的研究。

## 4 展望

展望未来的研究方向,有助于深入挖掘和发现科学领域的新知识和新方法,为农业生产提供更有利的帮助。为此,我们提出以下建议:

(1) 把握未来研究与发展方向。对于磷转化微生物,未来的研究应当坚持基础理论与应用研究并重的发展方向,注重本领域的创新性,同时要结合实际应用需求,积极开展与磷资源保护和利用、农业生产、环境保护等相关学科的合作研究,推进磷转化微生物的应用技术研究,并寻求相关问题的系统性解决方案,以促进经济、环境、社会的可持续发展。

(2) 应用新兴技术与研究方法。例如,发展高通量磷代谢组学和基因组学技术,帮助解析微生物内部的磷转化代谢网络,构建大规模磷转化微生物基因组数据和样本库,深入了解微生物多样性,拓宽研究视野并推动行业发展。

## REFERENCES

- [1] XIN ZK, GONG WQ, HU C, LI YB, HUANG W. Study on screening of phosphate-solubilizing microbes and their ability of phosphorus removal[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(1): 121-124.
- [2] 孙波, 廖红, 苏彦华, 许卫锋, 蒋瑞霖. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 210-219.
- SUN B, LIAO H, SU YH, XU WF, JIANG YJ. Advances in key coordinative mechanisms in soil-root-microbe systems to affect nitrogen and phosphorus utilization[J]. Soils, 2015, 47(2): 210-219 (in Chinese).
- [3] SHEIK AR, MULLER EEL, WILMES P. A hundred years of activated sludge: time for a rethink[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5: 47.
- [4] MOHAMED TA, WU JQ, ZHAO Y, ELGIZAWY N, EL KHOLY M, YANG HY, ZHENG GR, MU DC, WEI ZM. Insights into enzyme activity and phosphorus conversion during kitchen waste composting utilizing phosphorus-solubilizing bacterial inoculation[J]. Bioresource Technology, 2022, 362: 127823.
- [5] ZHANG TY, JIN W, LI T, WEI W, LI CJ, MIAO L, LI LL. Screening of affinity phosphate-solubilizing bacteria from typical purple soil and its growth promoting effect[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(6): 21-26.
- [6] FAGERIA NK, MOREIRA A, dos SANTOS AB. Phosphorus uptake and use efficiency in field crops[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(13): 2013-2022.
- [7] BABANA AH, ANTOUN H. Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mali[J]. Plant and Soil, 2006, 287(1/2): 51-58.
- [8] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- CHEN Y, CHEN CM, LIU ZY, HU ZG, WANG XW. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253 (in Chinese).
- [9] 萧涵, 周宇飞, 陈毅欣, 胡腾飞, 刘仲华, 黄建安, 李勤. 基于 CiteSpace 的乌龙茶香气研究知识图谱分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 344-351.
- XIAO H, ZHOU YF, CHEN YX, HU TF, LIU ZH, HUANG JA, LI Q. Visual analysis of oolong tea aroma research based on CiteSpace[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 344-351 (in Chinese).
- [10] 张鑫, 王吉, 胡静荣, 王莹, 来静, 周丽媛, 朱迎春. 基于 CiteSpace 和文献计量分析平台的鱼糜研究可视化分析[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 362-370.
- ZHANG X, WANG J, HU JR, WANG Y, LAI J, ZHOU LY, ZHU YC. Visual analysis of surimi research using CiteSpace and bibliometric analysis platform[J]. Food Science, 2023, 44(1): 362-370 (in Chinese).
- [11] 赵衍, 杨喆涵. 基于知识图谱的我国高校图书馆个性化推荐研究综述[J]. 上海管理科学, 2021, 43(5): 116-124.
- ZHAO Y, YANG ZH. Literature review of the research

- on personalized recommendation of Chinese university libraries based on knowledge graph[J]. Shanghai Management Science, 2021, 43(5): 116-124 (in Chinese).
- [12] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.  
WANG SQ, YU GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Journal of Ecology, 2008, 28(8): 3937-3947 (in Chinese).
- [13] 魏丹, 杨华薇, 陈延华, 吕春玲, 毕睿忻, 张馨元, 马茂亭. 有机酸对土壤磷的活化利用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1391-1399.  
WEI D, YANG HW, CHEN YH, LÜ CL, BI RX, ZHANG XY, MA MT. Research on the activation and regulation of soil phosphorus by organic acids[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(7): 1391-1399 (in Chinese).
- [14] 李静, 赵婧娴, 廉鑫, 李天森. 基于 CiteSpace 的磷形态研究进展及前沿分析[J]. 环境生态学, 2021(6): 85-90, 94.  
LI J, ZHAO JX, LIAN X, LI TS. Research progress and frontier of phosphorus speciation based on CiteSpace[J]. Environmental Ecology, 2021(6): 85-90, 94 (in Chinese).
- [15] 王毅, 张俊清, 况帅, 管恩森, 嵯其翠, 宋晓培, 芦伟龙, 王大海, 刘跃东, 张继光. 施用小麦秸秆或其生物炭对烟田土壤理化特性及有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 285-294.  
WANG Y, ZHANG JQ, KUANG S, GUAN ES, ZHUO QC, SONG XP, LU WL, WANG DH, LIU YD, ZHANG JG. Effects of wheat straw and its biochar application on soil physiochemical properties and organic carbon fractions in flue-cured tobacco field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(2): 285-294 (in Chinese).
- [16] 池景良, 郝敏, 王志学, 李杨. 解磷微生物研究及应用进展[J]. 微生物学杂志, 2021, 41(1): 1-7.  
CHI JL, HAO M, WANG ZX, LI Y. Advances in research and application of phosphorus-solubilizing microorganism[J]. Journal of Microbiology, 2021, 41(1): 1-7 (in Chinese).
- [17] 王光华, 赵英, 周德瑞, 杨谦. 解磷菌的研究现状与展望[J]. 生态环境, 2003(1): 96-101.  
WANG GH, ZHAO Y, ZHOU DR, YANG Q. Review of phosphate-solubilizing microorganisms[J]. Ecology and Environment, 2003(1): 96-101 (in Chinese).
- [18] 王富民, 刘桂芝, 张彦, 吴皓琼, 沙长青, 李雅文, 王延秋, 徐浩林, 徐光云. 高效溶磷菌的分离、筛选及在土壤中溶磷有效性的研究[J]. 生物技术, 1992, 2(6): 34-37.  
WANG FM, LIU GZ, ZHANG Y, WU HQ, SHA CQ, LI YW, WANG YQ, XU HL, XU GY. Study of separate and select for the dissolve phosphorus microorganisms as well as the effect of dissolve phosphorus in soil[J]. Biotechnology, 1992, 2(6): 34-37 (in Chinese).
- [19] HU C, YANG O, WANG LX, YAN BX, LI YX, BAO MW. Dissolved organic carbon, a critical factor to increase the bioavailability of phosphorus during biochar-amended aerobic composting[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 113: 356-364.
- [20] 柯春亮, 陈宇丰, 周登博, 黄绵佳, 张锡炎, 高祝芬. 香蕉根际土壤解磷细菌的筛选、鉴定及解磷能力[J]. 微生物学通报, 2015, 42(6): 1032-1042.  
KE CL, CHEN YF, ZHOU DB, HUANG MJ, ZHANG XY, GAO ZF. Isolation, identification and phosphate solubilization analysis of phosphate-solubilizing bacteria derived from banana rhizosphere soil[J]. Microbiology China, 2015, 42(6): 1032-1042 (in Chinese).
- [21] DAI ZM, LIU GF, CHEN HH, CHEN CR, WANG JK, AI SY, WEI D, LI DM, MA B, TANG CX, BROOKES PC, XU JM. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. The ISME Journal, 2020, 14(3): 757-770.
- [22] KELLER M, OBERSON A, ANNAHEIM KE, TAMBURINI F, MÄDER P, MAYER J, FROSSARD E, BÜNEMANN EK. Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(3): 385-393.
- [23] RICHARDSON AE. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants[J]. Functional Plant Biology, 2001, 28(9): 897.
- [24] KHAN MS, ZAIDI A, WANI PA. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2007, 27(1): 29-43.
- [25] 安健, 伏光辉, 阮记明, 陈百尧, 龚琪本, 唐兴本, 杨先乐. 反硝化除磷菌筛选及其特性研究[J]. 微生物学通报, 2012, 39(2): 162-171.  
AN J, FU GH, RUAN JM, CHEN BY, GONG QB, TANG XB, YANG XL. Studies on the screening of denitrifying and phosphorus removal bacteria and its characteristics[J]. Microbiology China, 2012, 39(2): 162-171 (in Chinese).
- [26] WAN WJ, WANG Y, TAN JD, QIN Y, ZUO WL, WU



- HQ, HE HM, HE DL. Alkaline phosphatase-harboring bacterial community and multiple enzyme activity contribute to phosphorus transformation during vegetable waste and chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122406.
- [27] 赵雪淞, 宋王芳, 高欣, 杨晨曦, 于洪波, 王冬旭. 秸秆还田和耕作方式对花生土壤微生物量、酶活性和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 126-132.  
ZHAO XS, SONG WF, GAO X, YANG CX, YU HB, WANG DX. Effects of straw returning and tillage methods on soil microbial biomass, enzyme activity and yield of peanut[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020(3): 126-132 (in Chinese).
- [28] 黄敏, 吴金水, 黄巧云, 李学垣. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. *生态环境*, 2003(3): 366-370.  
HUANG M, WU JS, HUANG QY, LI XY. Process in research on microbiological action of soil phosphorus[J]. *Ecology and Environmnet*, 2003(3): 366-370 (in Chinese).
- [29] 刘津, 李春越, 邢亚薇, 王益, 薛英龙, 王苾蓉, 党廷辉. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 157-164.  
LIU J, LI CY, XING YW, WANG Y, XUE YL, WANG CR, DANG TH. Effects of long-term fertilization on soil organic phosphorus fractions and wheat yield in farmland of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 157-164 (in Chinese).
- [30] LIU JS, MA Q, HUI XL, RAN JY, MA QX, WANG XS, WANG ZH. Long-term high-P fertilizer input decreased the total bacterial diversity but not *phoD*-harboring bacteria in wheat rhizosphere soil with available-P deficiency[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 149: 107918.
- [31] 高文翠, 杨卫君, 贺佳琪, 贾永红, 徐万里, 马海刚. 生物炭添加对麦田土壤微生物群落代谢的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 3998-4004.  
GAO WC, YANG WJ, HE JQ, JIA YH, XU WL, MA HG. Effects of biochar on soil microbial community metabolism in wheat field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(12): 3998-4004 (in Chinese).
- [32] ACEVEDO E, GALINDO-CASTAÑEDA T, PRADA F, NAVIA M, ROMERO HM. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Colombia[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 80: 26-33.