

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.004

赵洪猛, 王慎强, 赵旭, 等. 基于 Citespace 的土壤碳氮磷交互研究可视化分析. 土壤, 2022, 54(4): 682–690.

# 基于 Citespace 的土壤碳氮磷交互研究可视化分析<sup>①</sup>

赵洪猛, 王慎强, 赵旭, 汪玉\*

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 为探究土壤碳、氮、磷领域的国际研究现状及发展变化趋势, 本文对 1990—2020 年 Web of Science 核心数据集中的 7 757 篇文献进行可视化分析, 利用 Citespace 软件对关键词、共被引文献、国家、机构、作者绘制科学知识图谱。研究表明: 国际土壤碳、氮、磷领域研究经历平稳期、缓慢增长期及快速增长期 3 个阶段, 目前处于快速发展阶段。土壤碳、氮、磷领域在研究方向上经历了养分和产量管理到环境质量监测与评估, 再到以微生物和土壤质量管理为主要方向的转变趋势; 对农业中添加有机物质、生物质炭等部分替代化学肥料, 降低农业碳排放, 减少农业面源污染研究积极推进。中国在该领域发文数量最多, 有力推动了土壤碳、氮、磷交互研究的发展, 国际间合作交流密切; 美国发文数量第二且中介中心性最高, 在该领域影响力最强。目前, 以土壤微生物过程耦合土壤碳、氮、磷计量比为主要研究热点, 研究分支大幅下降。

**关键词:** 土壤碳、氮、磷; Citespace; 文献计量分析

**中图分类号:** S158.2      **文献标志码:** A

## Visual Analysis for Soil C, N and P Interaction Based on Citespace Analysis

ZHAO Hongmeng, WANG Shenqiang, ZHAO Xu, WANG Yu\*

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In order to explore the research status and development trends in the field of soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) interaction, 7 757 literatures in the core data of Web of Science from 1990 to 2020 were visually analyzed, and Citespace software was used to draw scientific knowledge graph of keywords, co-cited documents, countries, institutions, and authors. The results showed that the international research in the field of soil C, N and P interaction has gone through three stages, including steady period, slow growth and rapid growth, which is currently in the stage of rapid development. In the field of soil C, N and P interaction, the research direction has experienced the transformation trend from nutrient and yield management to environmental quality monitoring and assessment, and now microorganism and soil quality management has been the main direction. The research on the addition of organic matter and biochar to agriculture instead of chemical fertilizers has been actively promoted in order to reduce agricultural carbon emissions and agricultural non-point source pollution. China has issued the largest number of papers in this field, which has strongly promoted the development of soil C, N and P interaction research, and own close cooperation with the international community. The United States has the second largest number of articles and the highest intermediary centrality, which has the strongest influence in this field. At present, the main research focus is the direction of soil microorganisms combined with the stoichiometric ratio of soil C, N and P, and the research branch decreases greatly.

**Key words:** Soil C, N and P; Citespace; Bibliometric analysis

碳、氮、磷等是植物所必需的营养元素, 参与生物的各种生命活动<sup>[1]</sup>。其中, 碳是生命体构成的一种基本元素, 氮是酶和叶绿素的重要组成部分, 磷参与核酸、磷脂、ATP 等的合成。植物所需的碳主要来自

于大气中, 通过光合作用吸收固定, 土壤则是植物氮、磷等养分的最重要来源。土壤碳的含量对于土壤质量、养分供应能力有重要的影响。目前越来越多的研究揭示了土壤中碳、氮、磷的相互作用, 由微生物介

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41671304)资助。

\* 通讯作者(wangyu@issas.ac.cn)

作者简介: 赵洪猛(1994—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤养分。E-mail: zhm2563019860@163.com

导的土壤碳、氮、磷养分循环是土壤养分构成的主要影响因素,主要由于土壤中的碳源可以提高土壤中微生物生物量碳的含量,从而有效提高土壤氮、磷养分的有效性与其供应能力<sup>[2]</sup>。土壤碳、氮、磷在生物体内以不同比例存在,但这些比例并不是任意的<sup>[3]</sup>。因此,其含量及供应能力直接影响植物的生长水平,进而改变作物体内碳、氮、磷水平<sup>[4]</sup>。

为保证粮食安全及需求,人们对土壤养分供应能力的研究从未间断。自20世纪90年代将土壤碳研究引进土壤养分系统,旨在研究土壤碳、氮耦合及碳、磷耦合等在土壤养分供应能力的作用,土壤碳、氮、磷方向的研究逐渐发展起来。尤其是近年来,随着化学计量学这一生态学概念引入到土壤学,土壤中碳、氮、磷计量比在土壤养分供给能力的影响及评价土壤质量等方向也成为土壤学研究的热点,并且在很大程度上决定了植物和土壤微生物的养分供应状况,并进一步反映了自然陆地系统的演替规律<sup>[5]</sup>。经过近20年的发展,自早期草地生态系统的有机碳(SOC)、氮、磷逐渐发展为农田、森林、湿地等不同生态系统中碳、氮、磷的研究,以及不同土地利用方式改变、不同气候带地区等土壤碳、氮、磷的变化规律<sup>[6-8]</sup>。同时,由于碳、氮、磷在土壤中的耦合对土壤中微生物群落的稳定性及种群丰富性具有重要的影响,进而对陆地生态系统有机质的积累和分解起重要作用<sup>[9-11]</sup>。因此,综合分析目前关于土壤碳、氮、磷互作的研究现状,研判该领域研究的轨迹及其未来发展态势对于土壤学研究具有重要意义。

数据可视化和分析软件可以通过对相同领域的文献进行整合分析,将各个文献之间的联系、区别进行定量分析,以时间的梯度展现各个阶段的主要研究内容及方向。常用的数据可视化和分析软件有 Arnetminer、PaperLens、Vosviewer 和 CiteSpace 等<sup>[12-13]</sup>。本研究全面梳理整合了1990年1月—2020年12月在 Web of Science (<http://wokinfo.com/>)核心合集数据库中收录的有关土壤碳、氮、磷研究方向的文献,利用 CiteSpace 和 Vosviewer 软件进行可视化分析,旨在认识该领域研究现状、研究热点变化过程及发展趋势,为未来的土壤碳、氮、磷研究选题提供参考及启示。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

土壤碳、氮、磷研究范围较为广泛,包括生态学、环境科学、微生物学、土壤科学等学科。本文所使用的数据来源于 Web of Science 核心合集和 CNKI 数据库,数据采集时间为2021年1月2日,Web of Science

核心合集检索主题为“土壤碳、氮、磷”(Topic=“soil carbon” and “soil nitrogen” and “soil phosphorus”),文献类型为 Article 和 Reviewer,为认识全球土壤碳、氮、磷的主要研究现状同时避免出现多种语言造成软件分析时出现混乱,将出版语言设置为“English”,时间跨度为1990—2020年,共检索出7 757篇与土壤碳、氮、磷互作相关的文献。所有文献都以 TXT 格式文件的形式下载,包括:标题、关键字、作者、摘要、参考文献、机构等,按次序分16批次导出记录,16个数据文件均以 CiteSpace 可识别的“download\_”作为文件名前缀。CNKI 数据库主要统计了1990—2020年有关土壤碳、氮、磷研究的发文数量。

### 1.2 研究方法

CiteSpace 软件通过将时间切片结合单位时间内相应领域的研究以生成相应的知识图谱,直观地给出特定领域文献的可视化结果,对文献的关键词进行整合分析,给出相应时间内的研究热点,以时间线来描述研究热点的变化,以及未来研究热点发展的趋势。同时,将该领域内文献的作者、机构等信息进行可视化分析,构建相应的作者、机构相关的网络图,表征他们之间联系。采用 CiteSpace 软件进行知识图谱可视化分析,通过“Node Types”模块中的节点类型分别选择研究机构(institution),进行土壤碳、氮、磷领域的科研合作网络分析;选择关键词(key words)、选择被引文献(reference)选项,进行关键词共发分析、参考文献的共被引分析,得到该领域的研究国家和机构合作图谱、共现图谱和共被引图谱。在软件中,将时间设置为1990年1月—2020年12月,“Years Per Slice”设置为1 a,根据关键词、参考文献、研究机构等选择不同的节点阈值,以保证分析更加准确。

## 2 结果与讨论

### 2.1 国内外期刊发文数量及时间分布

国内外期刊发文数量随时间的变化直接反映土壤碳、氮、磷交互方向研究的关注度和发展速度。该领域的发文数量在国外期刊和国内期刊有着相同的变化趋势,都经过了平稳期、缓慢增长期、快速增长期3个阶段(图1)。国内期刊在2002年之前年发文数量较为平稳,2003—2014年属于缓慢增长期,2014年以后迅速增长。国外期刊在2004年之前发文量增长较为平稳,2005—2012年之间缓慢增长,2012年后增长迅速。结果说明2012年后,国内外学者对土壤碳、氮、磷方向的关注度越来越高,土壤碳、氮、磷研究成为土壤学研究领域的一大热点。

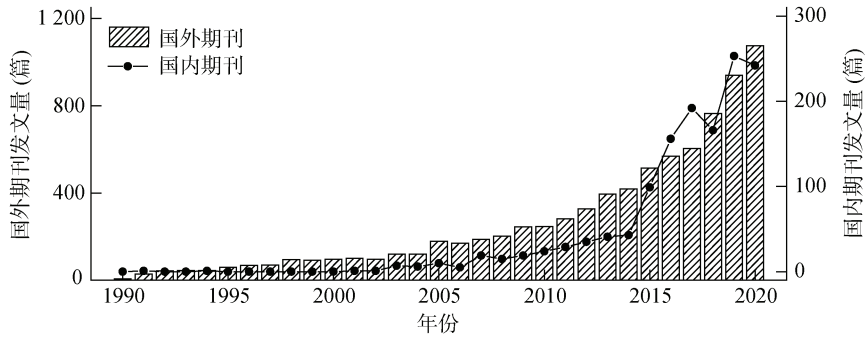


图 1 土壤碳、氮、磷研究的发文数量(1990—2020 年)

Fig. 1 Number of published papers on soil C, N, P research from 1990 to 2020

2.2 研究热点及发展趋势

将关键词按照时间每 1 a 进行切片分析得到关键词的时区演化图(图 2), 能直接反映不同时间阶段内研究的热点以及研究前沿发展趋势及其衍生关系, 进而有助于对未来研究方向的发展做出恰当的分析。20 世纪 90 年代土壤碳、氮、磷方向初步开始研究, 截止到 2006 年出现了众多分支, 包括植物营养、微生物、生态环境、

气候变化、有机肥、土壤质量等方面。自 2007 年开始, 由于高通量测序等方面的技术突破, 为土壤中微生物的研究提供了先进的方法, 研究范围逐渐主要围绕土壤微生物方向开展深入研究。同时在防治黄土高原水土流失及国家推进生态环境建设的倡议下, 对黄土高原等方向的研究逐渐增多, 生态化学计量学也成为评价土壤环境质量的一个重要研究方向<sup>[14-15]</sup>。

December 16, 2021 at 4:30:56 PM CST  
 WoS: /Users/zhm/CiteSpace/soil C N P/data  
 Timespan: 1990-2020 (Slice Length=1)  
 Selection Criteria: Top 10.0% per slice, up to 100, LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0  
 Network: N=562, E=1186 (Density=0.0075)  
 Largest CC: 560 (99%)  
 Nodes Labeled: 1.0%  
 Pruning: Pathfinder

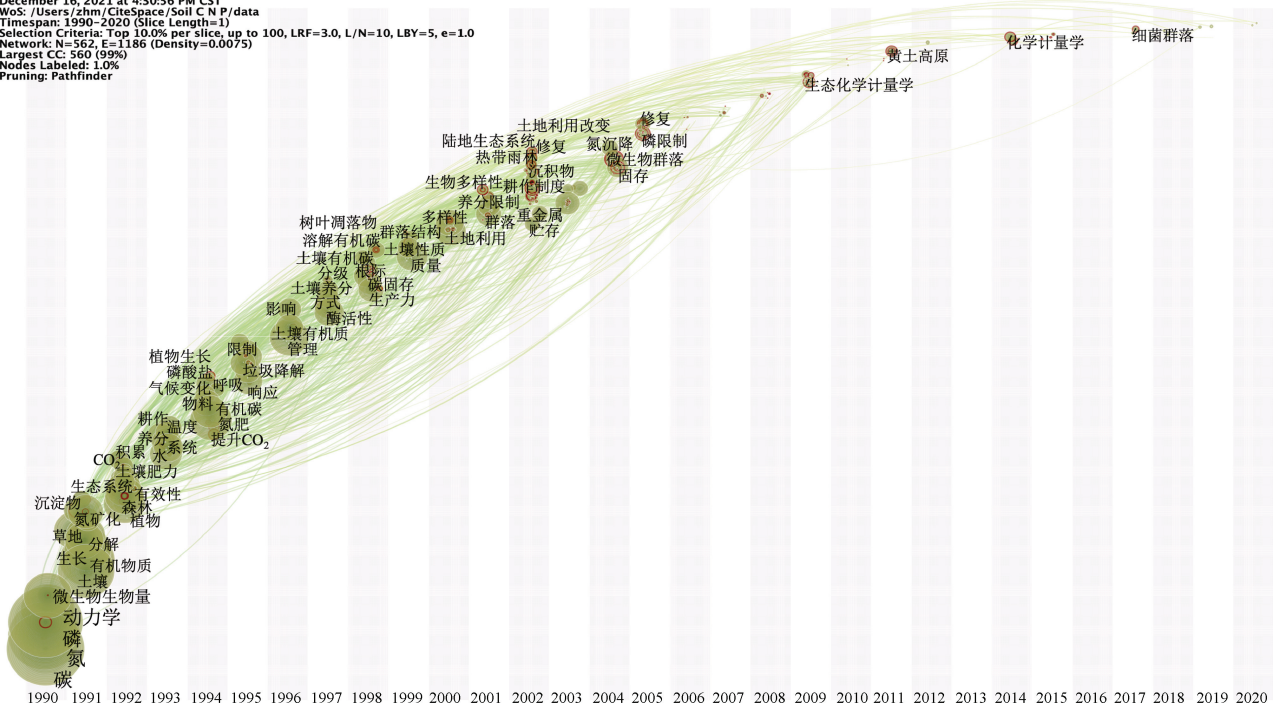


图 2 关键词时区演化图

Fig. 2 Time-zone viewer of keywords

关键词突现分析是探测关键词在某个时间点开始突然的一个较大变化, 以及变化的时间区间, 可以发现关键词即研究点衰落或者兴起的情况。节点阈值选择的方法是“每片最高 n%”, 按照软件默认为 10%(表 1)。20 世纪 90 年代关键词主要集中表现在对土壤碳、氮、磷等元素的研究, 这个阶段重视养分

管理对土壤养分有效性及作物产量的作用。在这个过程中大致分两个方面: 一是对养分例如氮素在土壤中的过程, 例如氮矿化、反硝化等研究; 二是重视不同耕作方式及添加物改良土壤的研究, 此阶段主要是应对耕地资源退化以及土壤资源与人口日益增长之间的冲突问题。进入 21 世纪初期, 随着环境问题愈发

表 1 高频和具有突现性的关键词信息表  
Table 1 Information table of high frequency and burst keywords

年份	关键词突现性及频次				
1990—2000	磷 (11.56, 2 611)	营养动态(9.06, 22)	热带草原(11.60, 25)	废弃物(10.23, 136)	
	氮矿化(22.73, 182)	营养(8.83, 16)	富集(11.25, 23)	针叶林(6.95, 15)	
	草地(22.67, 70)	微生物生物量碳(7.91, 15)	比率(8.39, 21)	松软(10.74, 26)	
	耕种(20.23, 56)	钙(6.94, 25)	残渣(10.89, 27)	保护性耕作(10.08, 21)	
	反硝化(9.94, 87)	水质(17.94, 61)	玉米(13.85, 34)	蚯蚓(7.47, 12)	
	转化(14.89, 54)	提取(11.63, 33)	草原土(11.70, 322)	容纳(7.47, 13)	
	二氧化碳 CO <sub>2</sub> (13.87, 152)	硫处理(7.59, 14)	释放(11.11, 48)		
	连续(12.68, 46)	径流(18.96, 61)	化学(10.48, 21)		
	梯度(10.51, 34)	微生物活动(14.42, 276)	湿地(13.11, 26)	肥力(12.41, 19)	
	溪流(9.10, 18)	土壤质量(9.09, 34)	侵蚀(9.04, 18)	大气二氧化碳(11.39, )	
2001—2010	运输(13.49, 26)	农田(8.77, 17)	土壤呼吸(11.43, 23)	流通量(8.39, 17)	
	污水污泥(10.67, 22)	溶解有机碳(8.55, 19)	堆肥(10.33, 24)		
	作物残茬(7.23, 16)	水稻(11.26, 33)	河流(9.80, 24)		
	森林开伐(7.21, 12)	团聚体稳定性(7.63, 14)	养分循环(8.65, 12)		
	2011—2020	雨林(19.40, 110)	生物炭(30.58, 162)	封存(10.54, 220)	生物多样性(10.32, 154)
	反硝化作用(10.56, 60)	植物生长(12.43, 116)	酸化(7.65, 49)	黄土高原(28.34, 165)	
	二氧化碳提高(7.89, 96)	细菌群落(32.84, 110)	中国(28.11, 92)	种植园(11.93, 59)	
一氧化二氮(7.05, 14)	微生物群落(24.05, 276)	N、P 计量比(12.41, 87)	施氮(8.54, 89)		
超营养作用(11.24, 29)	生态化学计量学(18.42, 113)	作物(11.46, 34)	沉积物(7.74, 164)		
模型(10.02, 45)	碳储存(15.81, 36)	畜牧业(10.66, 19)	磷限制(7.00, 162)		
光合作用(9.02, 64)	土地利用方式改变(14.04, 103)	利用率(7.30, 87)			
陆地生态系统(19.85, 92)	植物多样性(12.84, 40)	热带雨林(11.75, 66)			

注：括号内数值前面为突现性，后面为频次。突现性表示关键词在某个时间段引用量有较大变化的情况，括号内数字表示变化的强度，即变化幅度越大，数值越大；频次则表示为关键词在突现过程中所出现的次数。

突出，如 CO<sub>2</sub> 排放加剧、全球加速变暖等<sup>[16-17]</sup>。土壤作为陆地最大碳库，在全球碳循环中的作用受到广泛关注。农业是主要的碳排放贡献者，为应对环境变化，我国采取了一系列措施，如禁止焚烧农作物秸秆，通过秸秆还田、秸秆炭化及其他循环利用等措施降低农业生产中的碳排放，同时采取粪便-秸秆堆肥、食物残渣堆肥等方式增加土壤碳储存，同时提高土壤肥力，改善土壤质量<sup>[18]</sup>。

近十年来，随着生态化学计量学这一生态学概念引入土壤学后，土壤碳、氮、磷计量比成为研究的热点。例如，不同维度气候条件下及树种转化森林土壤的碳、氮、磷计量比特征<sup>[19]</sup>；农田生态系统不同有机无机添加下土壤碳、氮、磷计量比变化对土壤养分供应及作物根系的影响等，包括生物质炭、有机肥等添加为土壤提供大量碳素，为土壤微生物提供了大量的能量，改变土壤微生物群落结构<sup>[20]</sup>。生物技术的突破为土壤中微生物及微生物量碳、氮、磷研究提供了有力手段，使土壤微生物研究得到快速发展，发文数量爆发式增长(图 1)。中国在土壤碳、氮、磷交互

等方面的研究成果日渐增多，中国作为关键词出现 92 次，说明在 2008 年 G20 峰会后，对于节能减排、降低碳排放付出了较多的努力也取得了一定的成绩。

关键词聚类分析突出了研究方向与关键词之间的关系，在本研究中，聚类分析共得出 17 个集群：“生态化学计量比”、“物质”、“小麦”、“CO<sub>2</sub>”、“提高 CO<sub>2</sub> 排放”、“磷”、“土壤微生物群落”、“湿地”、“热带草原”、“生物降解”、“土壤呼吸”、“氮同位素”、“反硝化”、“北极苔原”、“土壤及环境危害”、“桉树”和“速率”(图 3)。其中生态化学计量比为最大的集群，研究时间开始得也较早，起初主要集中于草地的研究，后期对土壤微生物生物量及微生物量碳、氮、磷计量比和土壤动物有了较多的研究<sup>[21]</sup>。随着农业发展以及化学肥料施用过程中带来的日益严重的环境问题，加速了绿色农业的推进，因此研究中第二大集群“物质”(根据时间轴上的关键词可理解为粪肥、生物质炭、秸秆还田、废弃物等)在土壤中的应用。集群“小麦”、“湿地”、“热带草原”、“北极苔原”和“桉树”是主要的研究对象，重点研究了人为影响和

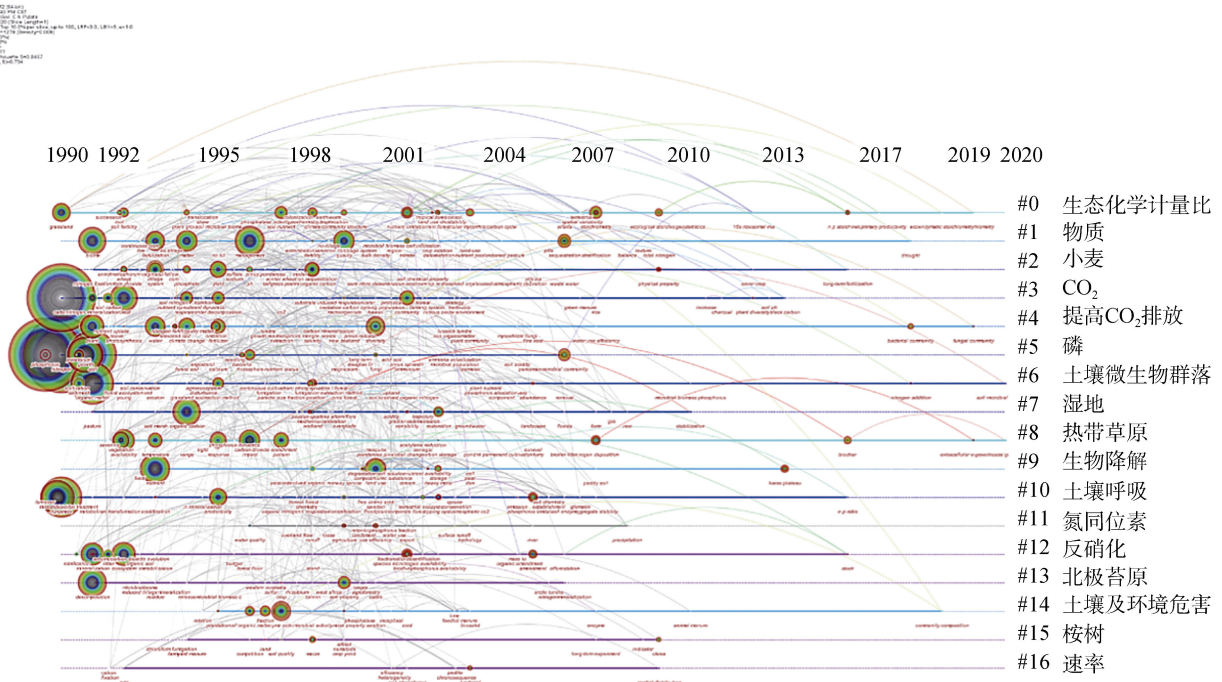


图 3 关键词聚类结果与时间轴分布  
Fig. 3 Keywords clustering results and timeline

自然条件下的不同生态系统中土壤的碳、氮、磷计量比等内容；“磷”、“生物降解”、“土壤呼吸”、“速率”、“氮同位素”和“反硝化”等集群显示了主要的研究内容，重点说明物质添加对土壤养分等方面的影响；“CO<sub>2</sub>”、“提高 CO<sub>2</sub> 排放”、“土壤及环境危害”等集群是指气候变化等环境问题与土壤养分化学计量学的关注。由于温室气体排放所导致的全球气候变暖给人类生存环境带来巨大的威胁，从政府、团体到科学家，节能减排以减少温室气体排放的呼声越来越高。土壤作为最大的碳库，不仅承担着“碳汇”的作用，同时也是大气中的主要“碳源”，“减源增汇”是我国应对全球气候变暖条件下提出的一项重要措施。此外，农业生产中大量施用化学肥料，所产生的 N<sub>2</sub>O 等温室气体也是主要的贡献者之一，以碳促磷、以碳控氮等方面的研究也越发受到关注。

2.3 研究主题分析

文献共被引是 1973 年美国情报学家 Small 提出的概念，可以作为测度文献间关系程度的一种研究办法，即两篇或多篇论文被后来一篇或多篇论文所引用，那么这两篇或多篇论文就构成了共被引关系。它们会秉承一定的研究脉络或者有类似的课题，因此通过文献共被引分析可以得到细分的研究主题。本文导入 7 757 篇文献，其参考文献共计 206 096 篇，节点阈值选择的方法是“每篇最高 n”。由于参考文献数量太大，选择 n=10 进行聚类分析，以关键词进行聚

类分析，将图谱以时间轴的形式展现(图 4)。共得到 16 个聚类：“代谢熵”、“磷限制”、“夏威夷”、“凋落物累积”、“植化相克”、“废弃物”、“长期定位试验”、“流量”、“冻融层”、“磷沉降”、“氮肥”、“松果树林”、“增加 CO<sub>2</sub>”、“蚯蚓”、“腐殖质形态”和“持续耕作”。

Citespace 将图谱网络结构与聚类分析计算出模块值 Q 和平均廓值 S 两个指标，来评判分析的合理性。其中模块值 Q 介于 0.4~0.8 为符合要求的图谱，大于 0.8 则合理性越强；平均廓值 S 为介于 0~1 的数值，越接近于 1，其相似度越高。本研究中，模块 Q 值为 0.849 9，说明图谱的网络结构十分显著，合理性较强，每个聚类的 S 值均为 0.9 以上，说明聚类之间的相关性较强。

比较关键词共发生聚类(图 3)和文献共被引聚类(图 4)的时间轴图谱，可以得出两个图谱之间具有较高的相似度。两者都包含研究内容、研究方法和研究地点。其中两者均对 CO<sub>2</sub>、磷素、氮素、土壤物质添加、土壤呼吸及湿地等方面有着相似或者相同的集群，表明这些不仅是研究的热点，同时也是重要的知识库。从文献共被引聚类分析时间轴图谱可以得出，其在时间轴上的分布显示了研究主题出现的先后顺序。最早是 20 世纪 90 年代初研究大气磷沉降，主要探究磷沉降对土壤养分的影响；90 年代中期对于土壤动物及微生物的活动开始较多的研究；而在 90 年代末 21 世纪初，对于长期试验和连续耕作等研究开

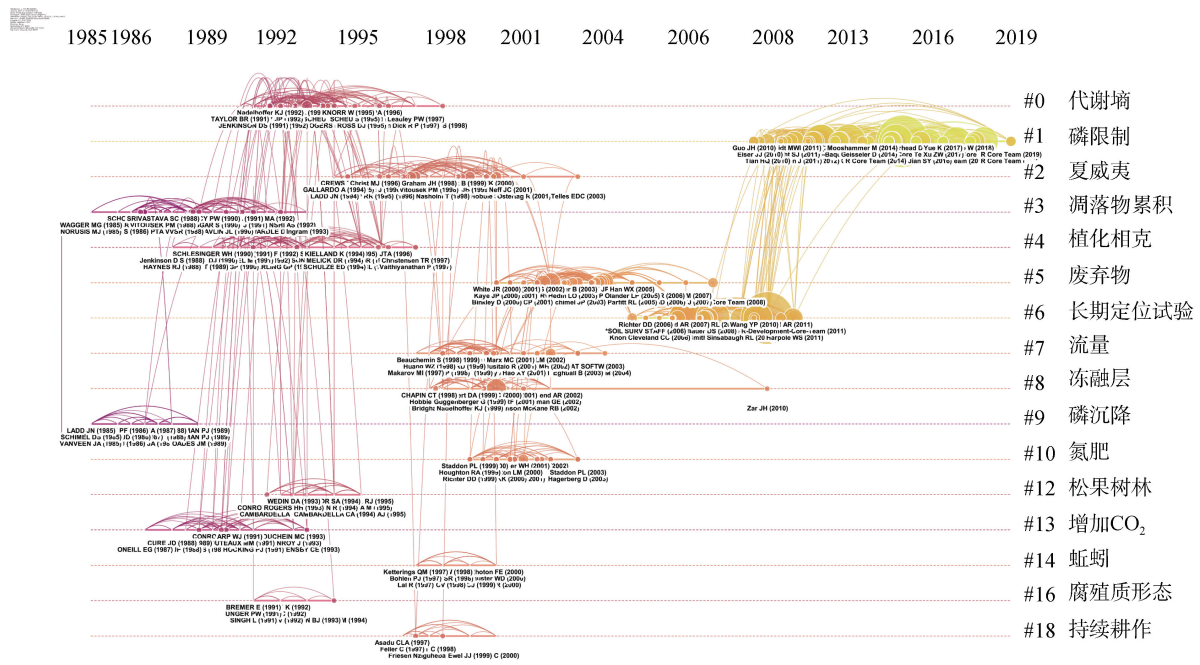


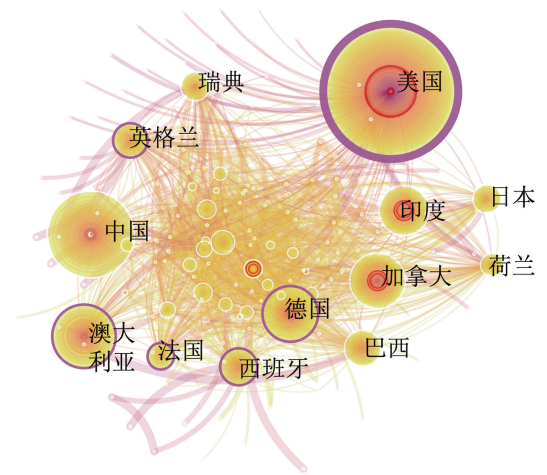
图 4 文献共被引关键词聚类时间轴图谱  
 Fig. 4 Time-line view of co-cited literature keywords cluster

始兴起,这个阶段研究热点的变化说明人们对于长期人为影响下的土壤状况包括物理性质及养分供应能力等关注度较高。磷不仅是植物所必需的营养元素,同时也是土壤微生物和土壤动物所必需的元素,近十年来,自磷限制的概念提出后,对土壤磷与微生物群落丰度及群落稳定性的相关关系成为研究的热点。

### 2.4 合作网络分析

对作者、机构和国家等 3 个方面进行合作网络分析,以说明其在该领域的重要性 and 相关性,揭示该领域全球研究力量的分布以及全球各国家、研究机构之间合作的分布和强度。我国作为农业大国,在土壤碳、氮、磷领域内发文数量最多,为 2 487 篇,但中心度为 0.04,突现强度为 0。我国是个农业大国,对于农业高度重视,目前在此领域虽然研究较多,但一直较为平缓,没有出现爆发似的增长,因此突现性较低,影响力需要加强。美国作为发文量第二的国家,其发文量为 2 041 篇,中心度为 0.43,突现强度为 57.28,说明美国所发表文章在国际上的影响力较强,具有突出地位(图 5,表 2)。中国和美国发文量占据该领域 1990—2020 年发文总量的 58% 以上,前 10 位的国家主要还有澳大利亚(629)、德国(530)、加拿大(486)、英国(457)、西班牙(324)、巴西(286)、法国(232)和瑞典(218)。图 5 共 171 个节点、1 457 条线,表明 171 个国家之间具有不同程度的合作。从节点的连线来看,美国与 59 个国家之间有着合作,中国与 37 个国家之间存在合作,美国和英国是主要的合作国家。中

心度  $\geq 0.1$  的国家共有 7 个,表示这些国家在土壤碳、氮、磷领域研究的影响较大。



(节点大小与发文量成正比,外圈用红色标注表示该节点具有较大的中心度(不小于 0.1),是图谱中的关键节点,突现性表征节点对应的研究在短时间内频次变化率高,相应的年轮内圈层为大红色)

图 5 国家合作网络图谱  
 Fig. 5 Network map of national cooperation

研究机构合作图谱共有 850 个节点、774 条连线,说明 850 个研究机构合作并不是很密切,中国科学院、中国科学院大学合作的研究机构主要为北京师范大学,与国外研究机构的合作程度较低;中国农业科学院与国外研究机构如西澳大利亚大学合作较为密切(图 6)。

表 2 发文量前 10 位的国家  
Table 2 Top 10 countries on number of published papers

国家	发文量(篇)	中心度	突现性	国家	发文量(篇)	中心度	突现性
中国	2 487	0.04		英国	457	0.05	5.65
美国	2 041	0.43	57.28	西班牙	324	0.16	4.19
澳大利亚	629	0.14		巴西	286	0.04	
德国	530	0.06	6.66	法国	232	0.12	4.93
加拿大	486	0.12		瑞典	218	0.06	

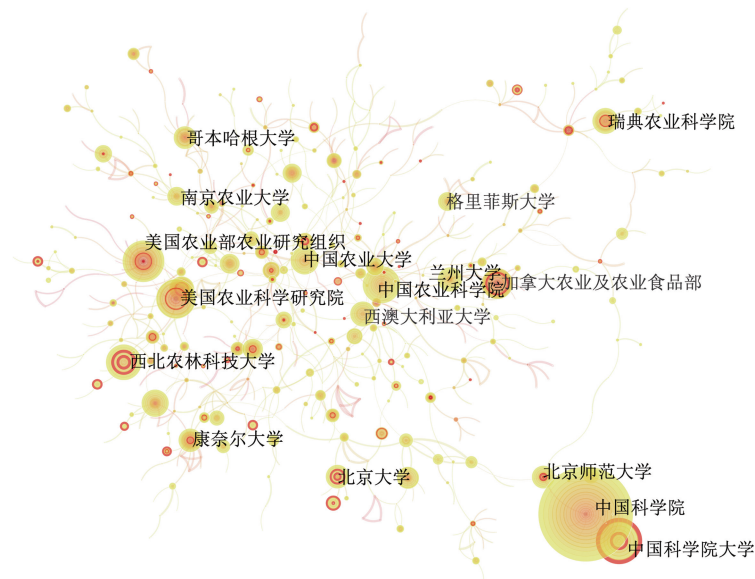


图 6 研究机构合作网络图谱

Fig. 6 Network map of institutional cooperation

在发文量前 10 位的机构中, 中国机构占了 6 家 (表 3), 中国科学院(CAS)991 篇, 中国科学院大学(UCAS)361 篇, 西北农林科技大学(NWAFU)226 篇, 中国农业科学院 (CAAS)155 篇, 中国农业大学(CAU)93 篇, 兰州大学(LZU)89 篇。美国农业部农业研究局(USDAARS)139 篇位居第五, 美国佛罗里达大学(UFL)123 篇位居第六, 加拿大农业及农业食品部

(AAFC)位居第七, 美国明尼苏达大学(UMN)位居第十。结合表 2 中国在世界范围内发文量第一, 即主要集中在上述 7 个机构中。大部分研究机构的中介中心性都小于 0.1, 说明研究力量较为分散, 而科罗拉多州立大学(CSUP)、哥廷根大学(GU)发文量和中心性分别为 51 篇、0.19 和 50 篇、0.13, 虽然发文量较少, 但其发表的文章具有较大的学术价值。

表 3 发文量前 10 位的研究机构统计  
Table 3 Top 10 research institutions in number of articles published

机构	所在国家	发文量(篇)	中心度	首发年份
中国科学院 CAS	中国	991	0.03	2002
中国科学院大学 UCAS	中国	361	0.00	2013
西北农林科技大学 NWAFU	中国	226	0.01	2013
中国农业科学院 CAAS	中国	155	0.08	2007
美国农业部农业研究组织 USDAARS	美国	139	0.07	1990
美国佛罗里达大学 UFL	美国	123	0.02	1999
加拿大农业及农业食品部 AAFC	加拿大	100	0.01	1998
中国农业大学 CAU	中国	93	0.02	2003
兰州大学 LZU	中国	89	0.06	2004
美国明尼苏达大学 UMN	美国	81	0.04	2003

作者合作网络分析直接显示该领域研究的核心学者以及研究人员之间的合作关系。图 7 共有节点 7 704 个，连线 16 576 条，表明在 1990—2020 年间共有作者 7 704 位，将引文数量(citation counts)设置为 15，以便在图上更清楚地显示。从图中可以得出，土壤碳、氮、磷交互领域的研究呈现整体分散但也

有部分集中的现象，主要的研究团队有 Zhang W、Zhou J Z、Kuzyakov Y 和 Han X H, Penuelas J 和 Sardans J, Xu M G 和 He X H, Liu G B、Xue S 和 Li P。发文量前 10 位的作者中，中国学者占据 6 位(表 4)，表明我国学者在土壤碳、氮、磷领域研究的参与程度与研究度较高。

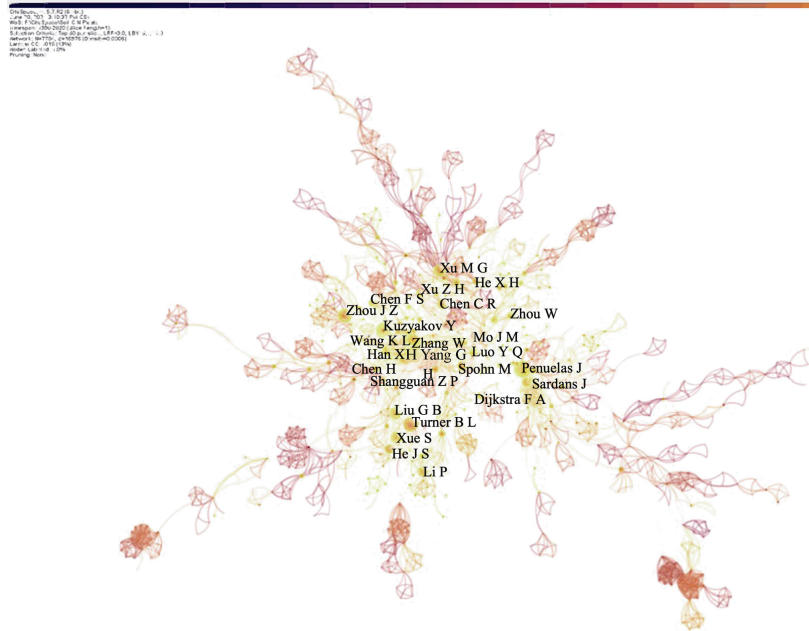


图 7 作者合作网络图谱  
Fig. 7 Network map of authors

表 4 发文量前 10 位的作者统计  
Table 4 Top 10 authors in number of articles published

作者	发文量(篇)	中心度	首发年份
Penuelas J	34	0.00	2015
Turner B L	30	0.01	2010
Zhou J Z	29	0.00	2007
Xu M G	29	0.00	2007
Zhang W	28	0.00	2015
Kuzyakov Y	23	0.00	2013
Sardans J	23	0.00	2015
Xue S	23	0.00	2012
Liu G B	22	0.00	2016
Yang G H	21	0.00	2015

### 3 结论

国际土壤碳、氮、磷交互领域的研究中，发文数量经历了平稳期、缓慢增长期、快速增长期 3 个阶段。中国在推动领域发展方面起到了重要作用，有 7 家机构的发文量位居世界前 10 位，得益于中国政府对农业的高度重视以及对环境保护的大力支持。同时美国

在该领域的研究中中介中心性最高，说明其在研究中有着主导作用。我国学者在该领域的参与度与关注度也较高。

从 1990—2020 年 30 a 的时间里，研究热点处于不断变化中：从 20 世纪 90 年代关注于土壤养分、作物产量等研究，到 21 世纪初关注土壤质量、环境风险等，直至现在以土壤微生物方向和土壤生态化学计量学为主要研究热点的多研究方向并进的现状。

目前，随着人类社会的发展，人们对土壤质量管理维持农业可持续发展、减少土壤碳排放、发挥土壤在全球碳循环中的固碳作用主要体现在以下方面：大力推动有机肥施用、秸秆还田等固碳措施；减少开发自然资源，削减化学肥料在农业生产中的环境负荷问题；大力发展生物技术，改良土壤，提高土壤养分供应能力。

从以上研究结果可以推测：未来土壤碳、氮、磷交互的主要研究方向将更倾向于土壤质量管理、农业可持续发展、发展生物技术以提高土壤养分的供给能力等方面，土壤碳、氮、磷计量比也可能会成为土壤质量评价的关键指标。



## 参考文献:

- [1] 欧延升, 汪霞, 李佳, 等. 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 38–45.
- [2] Zhu Z K, Ge T D, Luo Y, et al. Microbial stoichiometric flexibility regulates rice straw mineralization and its priming effect in paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 67–76.
- [3] 曹小玉, 李际平, 杨静, 等. 不同龄组杉木林土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征[J]. 土壤, 2019, 51(2): 290–296.
- [4] 王振南, 杨惠敏. 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 927–934.
- [5] Li Y, Wu J S, Liu S L, et al. Is the C: N: P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(4): GB4002.
- [6] Li J W, Liu Y L, Hai X Y, et al. Dynamics of soil microbial C: N: P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133613.
- [7] 方璞, 安韶山, 马任甜. 云雾山不同恢复方式下草地植物与土壤的化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 80–88.
- [8] 方华军, 耿静, 程淑兰, 等. 氮磷富集对森林土壤碳截存的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 1–11.
- [9] 陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 451–457.
- [10] Soong J L, Marañon-Jimene S, Cotrufo M F, et al. Soil microbial CNP and respiration responses to organic matter and nutrient additions: Evidence from a tropical soil incubation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 141–149.
- [11] Buchkowski R W, Schmitz O J, Bradford M A. Microbial stoichiometry overrides biomass as a regulator of soil carbon and nitrogen cycling[J]. *Ecology*, 2015, 96(4): 1139–1149.
- [12] 张力, 赵星, 叶鹰. 信息可视化软件 CiteSpace 与 VOSviewer 的应用比较[J]. 信息资源管理学报, 2011, 1(1): 95–98.
- [13] 宋秀芳, 迟培娟. Vosviewer 与 Citespace 应用比较研究[J]. 情报科学, 2016, 34(7): 108–112, 146.
- [14] Olawoyin R, Heidrich B, Oyewole S, et al. Chemometric analysis of ecological toxicants in petrochemical and industrial environments[J]. *Chemosphere*, 2014, 112: 114–119.
- [15] 丛萍, 逢焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 811–823.
- [16] 李彬彬, 武兰芳. 土壤温室气体排放对 C/N 的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2067–2078.
- [17] 刘四义, 张晓平, 梁爱珍, 等. 玉米和大豆秸秆还田初期对黑土 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2421–2427.
- [18] 董文, 张青, 罗涛, 等. 不同有机肥连续施用对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28): 106–110.
- [19] 李树斌, 周丽丽, 陈宝英, 等. 亚热带树种转换对林地土壤碳氮磷计量比的影响[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(6): 575–583.
- [20] 彭亚敏, 武均, 蔡立群, 等. 免耕及秸秆覆盖对春小麦-土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1062–1072.
- [21] 李欢, 王冲, 汪顺义. 蚯蚓与菌根提高玉米生长和氮磷吸收的互补效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 920–926.