

# 近 30 年国内外土壤有机碳研究进程解析与展望

周 咪<sup>1</sup>, 肖海兵<sup>2</sup>, 聂小东<sup>1</sup>, 李忠武<sup>1</sup>, 邓楚雄<sup>1</sup>, 刘俊宇<sup>1</sup>, 张宇婷<sup>1</sup>

(1.湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**采用 Citespace 文献计量学软件对 Web of Science 和 CNKI 的土壤有机碳科学领域的文献进行了梳理统计。通过分析关键词的频次、中心性、聚类 and 突变词,厘清近 30 年国内外土壤有机碳研究领域的发展脉络,分析探讨相关研究的发展方向。结果表明:国际上土壤有机碳研究发展过程可分为 3 个阶段,研究内容经历了由以碳循环为核心的土壤有机碳动态学研究、全球变化为主的问题导向研究向以农业管理为主的土壤固碳封存研究转变。国内土壤有机碳研究发展时间较短,研究方法和研究体系不够完善,研究内容经历了由农业生产与发展为主的土壤有机碳基础研究,土壤有机碳的循环与分布为主的研究向碳储量与农田碳汇为主的研究转变。国内相关研究起步较晚,与国际相比在研究内容、研究尺度、问题导向、发展脉络上存在差异。目前,土壤有机碳储量和农业管理为核心的土壤固碳封存的相关研究是国内土壤有机碳研究领域的总体发展趋势。

**关键词:**土壤有机碳; 研究热点; Citespace; 研究趋势

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0391-10

## Analysis and Prospect of Soil Organic Carbon Research Process in Recent 30 Years at Home and Abroad

ZHOU Mi<sup>1</sup>, XIAO Haibing<sup>2</sup>, NIE Xiaodong<sup>1</sup>, LI Zhongwu<sup>1</sup>,  
DENG Chuxiong<sup>1</sup>, LIU Junyu<sup>1</sup>, ZHANG Yuting<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Citespace bibliometrics software was used to sort out the literature regarding soil organic science in Web of Science and CNKI. By analyzing the frequency, centrality and clustering of keywords, and mutation words, we clarify the development of soil organic carbon research at home and abroad over the last 30 years, as well as analyze and discuss the development direction of related research. The results show that the international development process of soil organic carbon research can be divided into three stages; the research content has changed from dynamics of soil organic carbon with carbon cycle as the core and the problem-oriented research based on global change to soil carbon sequestration in agricultural management; the development time of research on soil organic carbon in China is relatively short, and the research methods and research systems are not perfect; the research content has changed from the basic research based on agricultural production and development, and soil organic carbon circulation and distribution to reserves and farmland carbon sink; in comparison, domestic research on SOC started later, and has obvious difference with international research in the aspects of research content, research scale, problem orientation, and development context. At present, the research on soil organic carbon storage and soil carbon sequestration in agricultural management is the overall development trend of soil organic carbon research at home and abroad.

**Keywords:** soil organic carbon; research hotspot; Citespace; research process

有机碳是土壤不可或缺的组分,是衡量土壤肥力的重要指标。土壤有机碳可通过土壤功能调节直接影响土壤质量,还可通过碳循环间接影响全球气候变

化,目前土壤有机碳的研究已经成为世界范围内的一个焦点。全球陆地土壤有机碳储量大约 1 200 ~ 2 500 Pg,约是大气碳库的 2 倍,生物碳库的 3 倍<sup>[1]</sup>,

收稿日期:2019-06-27

修回日期:2019-07-30

资助项目:国家重点研发计划“红壤低山丘陵区水土流失演变规律与驱动机制”(2017YFC0505401)

第一作者:周咪(1995—),女,安徽灵璧人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与碳循环关系研究。E-mail:zhoumi\_hunnu@163.com

通信作者:李忠武(1972—),男,湖南望城人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与碳循环关系研究。E-mail:lwz17002@hunnu.edu.cn

因而土壤有机碳的微小变化将会引起大气中  $\text{CO}_2$  浓度的较大波动,因此研究土壤有机碳对应全球气候变化具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

国际上早在 18 世纪 80 年代人们关注土壤中的黑色物质开始,土壤有机碳的研究就进入萌芽时期,但起初由于土壤有机碳的科学研究发展缓慢,近百年来文章数量屈指可数。直到 20 世纪 90 年代“3S”技术的发展,为土壤有机碳的研究提供了新的方法与手段,土壤有机碳领域的文献数量如雨后春笋般快速增长,因而 20 世纪 90 年代以来的相关研究是土壤有机碳发展的重要演变过程。

近年来,随着文献计量学的发展,Citespace 逐渐成为系统分析一研究领域发展过程的重要方法。此外,环境科学、农学、生态学、化学和土壤学等学科之间交叉与渗透逐渐增强<sup>[3]</sup>,使土壤有机碳的相关研究取得飞速发展。但土壤有机碳的研究发展过程中依旧存在碳循环机理不明确、碳库的估算不统一等问题,土壤有机碳的研究仍然面临着巨大的挑战。因而本文拟采用文献计量学方法,对近 30 a 来国内外土壤有机碳研究领域的文献进行分析,理清脉络,探讨土壤有机碳研究发展动态,为土壤有机碳的研究提供借鉴。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

研究数据来源于 CNKI 和 Web of Science 两大信息数据库,数据采集时间为 2019 年 1 月 12 日。知网以“土壤有机碳”为主题,文献类别选择“核心期刊”,检索到最早的年份是 1993 年,因此时间设置 1993—2018 年,经检索和筛选后共得到 2 745 篇文献。外文文献以 Web of Science 数据库为数据源进行检索,选择数据库为核心合集,以“soil organic carbon”为主题,文献类型选择“Article”,时间设置 1991—2018 年,经检索和筛选后共得到 11 648 篇文献(图 1)。

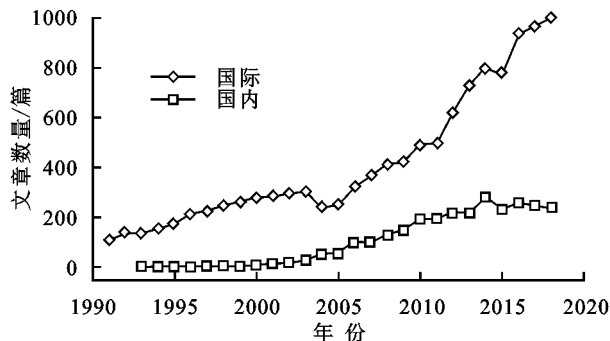


图 1 国内外近 30 a 土壤有机碳研究文章数量

### 1.2 研究方法

Citespace 软件是由陈超美博士在 2004 年开发的,2007 年首次引入中国,它可对文献的关键词、主

题词、国家、机构和作者等做可视化分析,是文献计量学的重要研究手段<sup>[4]</sup>。采用 CitespaceV 对 CNKI 和 Web of Science 的文献进行统计分析,并利用 Origin 2018 进行制图,通过分析关键词的中心性、聚类 and 突变强度等图谱作为其领域研究热点、前沿和趋势。

其中,中心性关键词量化点是 Citespace 中重要地位的图论概念,中心性较高的关键词可体现其在关键词共现网络中的重要性,在一定程度上可反映某一领域在一定时期的研究热点<sup>[5]</sup>。在本文的数据分析设置中,Node Type 选择 Keywords, Selection Criteria 选取 TOP N = 50, Pruning 选择 Pathfinder, Pruning sliced networks 和 Pruning the merged network,其他选择默认。

### 1.3 总体概况

根据国内外年发文量的统计分析(图 1),初步可以看出,国际土壤有机碳研究的文章数量除 2004 年、2005 年、2015 年略有下降外,总体上处于上升趋势,年均增长率为 9%。国内土壤有机碳研究的文章数量一直处于稳步上升趋势(除 2015 年略有下降外),年均增长率为 21%。从相关研究的学科交叉情况看(图 2),目前国内土壤有机碳研究主要集中在农学、林学和草学,生态学、环境科学、生物学、地质学、化学和工程学也有分布;国际则以农学、土壤科学、环境科学与生态为主要相关学科,其次是生态学、地理学、植物学、水资源科学和化学。综合来看土壤有机碳研究是一种多学科交叉的研究领域,利用多学科的交叉理论与方法来研究土壤有机碳领域的科学问题已经成为一种趋势。

## 2 国际土壤有机碳研究进程

通过 Citespace 的突变词检验分析得出,以 1991—2000 年、2001—2010 年、2011—2018 年 3 个突变时间跨度为主,因此将国际发展进程分为这 3 个阶段。“十字号”大小表示关键词频次的高低,连线的多少表示聚类的分散程度。过去 30 a,随着时间的推移,关键词之间的连线逐渐减少,但频次增加,聚类分异程度降低,不同研究领域交叉融合逐年增强。“动态”、“氮”和“气候变化”3 个时期均是高频词,表明这些内容一直是土壤有机碳的研究重点。“碳循环”、“土地利用变化”、“侵蚀”、“封存”和“管理”逐渐成为研究热点,表明土壤有机碳领域由早期以土壤碳循环为核心的动态学研究,逐渐转向全球变化为主的问题导向研究,而目前趋势是农业管理为核心的土壤固碳封存的相关研究。

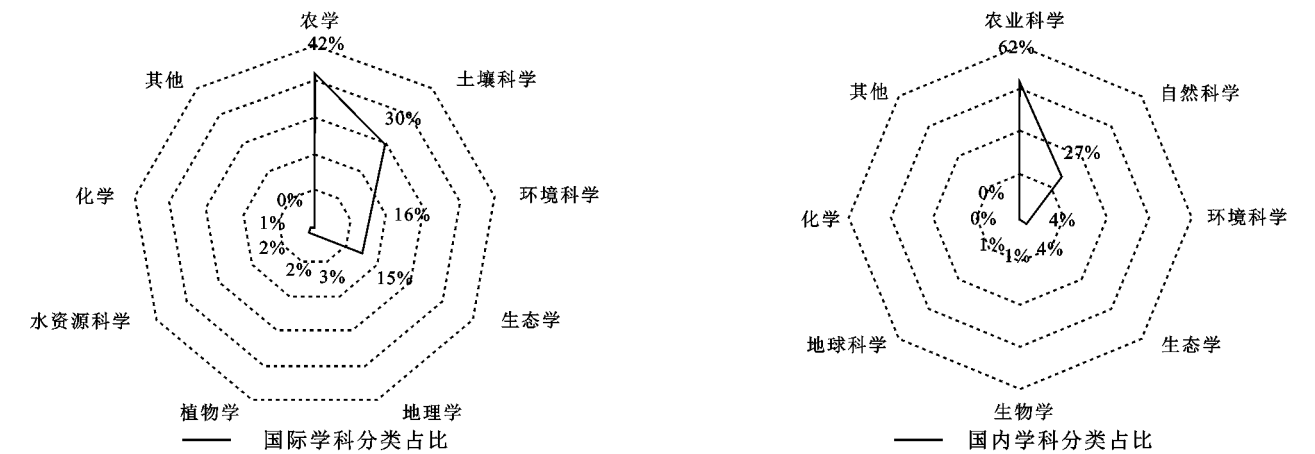


图 2 基于 CNKI 和 Web of Science 的土壤有机碳研究领域学科分类

2.1 以碳循环为核心的土壤有机碳动态学基础研究时期(1991—2000 年)

1991—2000 年发文量 1934 篇,约占总发文量的 16.6%,从文献计量图谱来看,连线较多,聚类相对分

散,高频次和高中心性的关键词可归纳为氮,循环,微生物量和分解 4 个方面(表 1 和图 3),说明此阶段围绕着土壤有机碳的循环、分解、转化以及土壤微生物量等开展了大量的土壤有机碳动态学研究。

表 1 国际土壤有机碳研究不同阶段前 10 位高中心性关键词

1991—2000 年			2001—2010 年			2011—2018 年		
关键词	中心性	频次	关键词	中心性	频次	关键词	中心性	频次
循环	0.38	10	土地利用变化	1.09	49	封存	1.28	920
微生物量	0.35	196	土壤有机碳	0.81	367	呼吸作用	0.97	377
颗粒	0.34	37	系统	0.80	152	植物	0.87	207
系统	0.33	56	封存	0.70	232	气候	0.86	264
吸附	0.26	111	管理	0.69	305	生态系统	0.85	387
垃圾	0.21	38	草地土壤	0.68	33	物质	0.82	1085
分解	0.20	165	侵蚀	0.57	14	耕作	0.50	426
生物量	0.19	85	耕种	0.54	140	碳	0.46	1015
密度	0.19	2	气候变化	0.48	181	储量	0.33	255
碳循环	0.17	6	牧场	0.43	21	氮	0.29	1180

土壤有机碳的动态变化受气候、植被、母质、地形、时间等自然因素和人类活动的影响<sup>[6]</sup>。目前以碳循环为核心的土壤有机碳的动态研究多采用模型模拟,如应用最广泛的 Century 模型和 Roth—C 模型可对不同气候和土地利用类型的土壤有机质动态进行长短期的模拟估算<sup>[7-8]</sup>。人类活动的影响表现在农产品种植类型的选择以及轮作对土壤有机碳的动态扰动<sup>[9]</sup>。碳储量的动态估算集中于中小尺度地形区,如 Moraes 等<sup>[10]</sup>通过土壤剖面资料和数字地图估算了巴西盆地的土壤碳氮储量,Rapalee 等<sup>[11]</sup>估算了加拿大北方森林的碳储量及累积损失过程。

除此之外,微生物量与土壤有机碳的关系也颇有关关注,土壤微生物是土壤有机质中最活跃的成分,涉及到土壤肥力,一定程度上控制着陆地系统生产力<sup>[12]</sup>。微生物量碳与土壤有机碳是反映土壤有机质变化的敏感指标,可以反映气候、植被等变化下土壤有机碳的变化与平衡<sup>[13]</sup>,微生物量的增加,可促进土

壤中有机碳的增加,同时微生物量碳也是陆地生态系统碳库的重要组成,是整个生态系统养分和能量循环的关键和动力<sup>[14]</sup>。农田土壤类型以及农垦变化对土壤有机碳、微生物量和微生物活性化的影响也不可忽视<sup>[15]</sup>,免耕对土壤质量的影响较小,可使土壤中的有机碳含量和微生物量增加。

该阶段开展了较为全面的土壤有机碳动态变化的基础研究,为土壤有机碳动力学的深入研究奠定基础,但对土壤碳循环的过程与机理的综合分析不够深入,碳循环各个环节的收支平衡以及内部与外部环境的转化机制并不明确,各种碳循环模型模拟存在局限性,研究方法尚未成熟。

2.2 以土地利用变化、气候变化等为主的土壤有机碳问题导向研究时期(2001—2010 年)

2001—2010 年发文量 3 390 篇,约占总体的 29.1%,年均发文量快速增加,国际土壤有机碳的研究内容日益广泛。“动态”、“氮”和“微生物量”频次持续增高,



是前一阶段研究的延续。这一时期新兴的高频和高中心性关键词可归纳土地利用变化、气候变化、土壤侵蚀和土壤稳定性等方面(表 1 和图 4)。1995 年 IGBP(国际地圈生物圈计划)和 HDP(全球变化人文计划)联合提出了应对人类活动和全球变化间的人与生物驱动影响土地利用变化及其对社会和环境的影响的 LUCC 研究计划<sup>[16]</sup>,此后土地利用变化成为全球变化研究的热点课题。表明了土壤有机碳领域的研究热点由碳循环为主的动态学研究转向了全球变化为主的问题导向型研究。

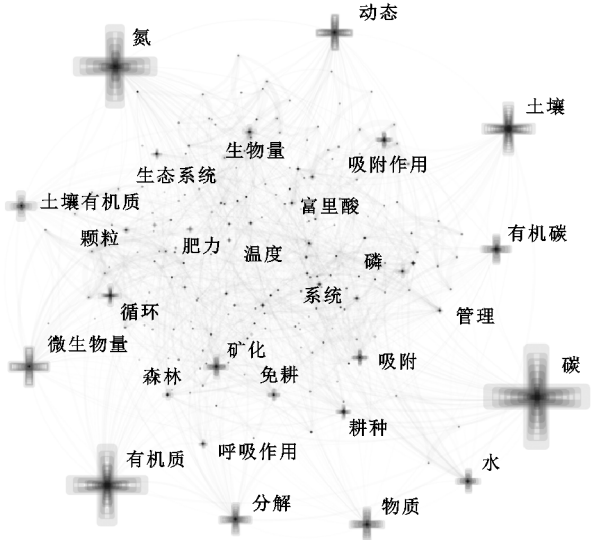


图 3 1991—2000 年国际土壤有机碳关键词聚类知识图谱



图 4 2001—2010 年国际土壤有机碳关键词聚类知识图谱

一方面,人类活动引起的土地类型转变,土地利用集约化以及土地管理方式变化,导致土壤的有机碳的输入、输出和降解速率发生变化,从而影响有机碳分布和平衡,主要表现为不同土地利用类型的变化控制土壤有机碳储量、改变土壤有机碳组分、影响碳循环机制<sup>[17-19]</sup>。另一方面,土壤有机碳储存和动态变化对全球增温的敏感性响应<sup>[20-21]</sup>,土壤中有有机物分解的温度

敏感性在一定程度上决定了有多少碳转移到大气中,温度通过影响植物光合作用以及有机碳分解,从而影响土壤中有有机碳的输入和输出,最终改变碳循环和碳储存,这种变化对森林生态系统和农田生态系统的影响尤为明显<sup>[22]</sup>。此外,土壤稳定性遭受破坏对土壤有机碳的储存也会造成极大的影响,土壤的大肆扰动导致土壤侵蚀。土壤侵蚀与沉积过程中土壤有机碳发生水平迁移,显著改变其空间分布,从而影响陆地生态系统的碳源汇格局<sup>[23]</sup>。但由于土壤侵蚀过程是多因素综合作用的结果,难以定量评价土壤侵蚀对碳源汇的影响,至今仍是一个具有争议的问题<sup>[24]</sup>。

这一时期的研究主题鲜明,围绕土地利用变化、全球气候变化等环境问题展开。虽然这一时期开展了大量土地利用变化的研究,但土地利用变化在土壤有机碳储量估算中存在不确定性,对土壤有机碳的动态影响机制研究也并未十分明确,今后应该注重土壤有机碳的长期动态监测,对碳循环进行定量研究,为解决当前面临的重大生态环境问题提供科学依据。

2.3 以农业管理对土壤有机碳库、固碳的影响为主的土壤有机碳系统研究时期(2011—2018 年)

2011—2018 年发文章 6 324 篇,约占总发文量的 54.3%,这 8 a 的国际文章数量比肩前 20 a 的文章数量,表明这一阶段是国际土壤有机碳研究飞速发展的时期。文献计量图谱的节点增多且频次增高,连线减少,聚类词有所减少,表明研究内容相对集中。研究热点除继承前两个阶段对土壤有机碳的动态学和全球变化影响的研究外,出现“土壤碳储量”、“土壤呼吸”、“氮”和“耕作”等热点词(表 1 和图 5),表明土壤有机碳的研究由全球变化等问题导向型研究转向了以农业管理为核心的土壤固碳封存研究。

为应对全球气候变化,IPCC 第四次计划提出可通过农业减排固定土壤中的有机碳,2015 年 12 月第 21 届联合国气候变化大会上法国农业部长正式提出“千分之四计划”<sup>[25]</sup>,表明土壤对调节气候暖变化的极端重要性。农田土壤碳库的变化可通过人工管理进行长期或短期的调节<sup>[26]</sup>。在全球碳库中只有农业碳库能够进行短期的调整,因此农业生产与管理在调节陆地生态系统碳封存和碳循环中发挥重要作用。此外,土壤呼吸对气候—碳循环的反馈也得到关注。土壤呼吸的温度敏感性是决定土壤有机碳对全球变暖响应的一个主要因素<sup>[27]</sup>,这是应对当今全球变化影响而派生的热点话题。土壤呼吸因受有机碳含量的间接影响而改变土壤有机碳的累积,研究土壤呼吸的变化能够有效预测土壤有机碳库的变化。

此阶段国际土壤有机碳的研究进入稳定发展时

期,研究内容和研究方法逐渐形成系统体系。值得一提的是土壤有机碳的动态变化和碳储量估算等基础研究再次到重视,但与前两个阶段相比,研究方法上采用目前比较先进的人工神经网络、高光谱遥感等技术进行预测<sup>[28-29]</sup>;研究尺度上土壤有机碳的动态监测倾向于宏观预测与微观监测相结合<sup>[30-31]</sup>;碳库的研究尺度以全球或区域大尺度为主,但由于不同学者选择的区域、深度和方法不同,导致大尺度或全球范围内土壤有机碳库的估算结果差异大。

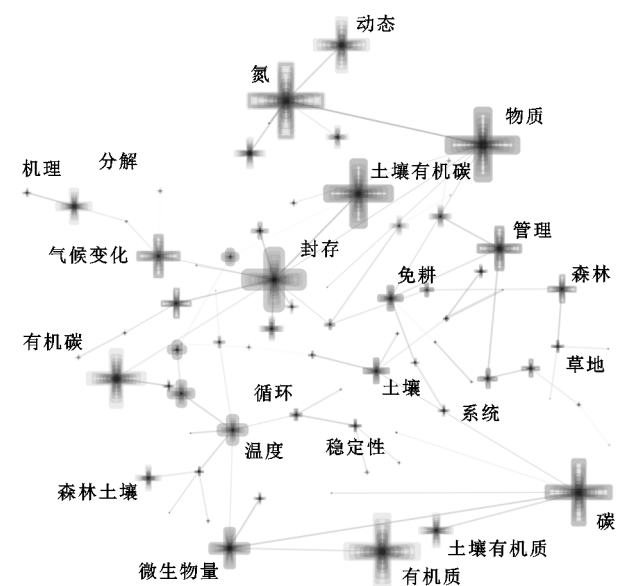


图 5 2011—2018 年国际土壤有机碳关键词聚类知识图谱

2.4 研究前沿与趋势

突变词是指一个变量的值在短期内发生巨变,是 Citespace 软件运用突变算法,从文献的题目、摘要、关键词以及文献记录的标志符中提取的突变术语<sup>[32]</sup>。突变性高表明某一学科领域研究兴趣的突然增长,它通常可用来辨识和追踪学科领域的研究前沿与发展新动态。对 1991—2018 年国际相关文献的关键词,采用突变词检测算法得到 107 个的突变词,选取了前 20 个突变性高的关键词做为土壤有机碳研究的前沿趋势。见表 2,突变时间较长的关键词是“耕种”、“吸附”和“吸附作用”。“耕种”的突现时间从 1992—2010 年,突变强度为 67.264 9,表明了农田土壤有机碳研究一直以来都是人们关注的焦点。“吸附”和“吸附作用”两者意义相似,综合两者来看突变时间是 1992—2009 年,突现强度也在 50 以上,土壤有机碳对不同的化学物质的吸附作用,特别是对有毒物二噁英、农药的吸附。而研究较多的是土壤有机碳对非的吸附,同时探究了土壤环境因子的变化对溶解性土壤有机碳吸附和分解的影响<sup>[33-34]</sup>。目前,趋向 2018 年最新的高强度突变词有“中国”、“生物炭”和“储量”,表明了当前土壤有机碳领域的研究前沿。“中国”一词突

强度自 2014 年以后比较高,究其原因是 2013 年以后中国土壤有机碳的科研发展迅猛,以其高数量和高质量的发文特点,成为国际土壤有机碳研究发展的中坚力量。“生物炭”,在时代周刊未来 20 大绿色科技产品中介绍了《自然—地理科学》一项最新研究发现,生物炭可以有效抵销全球 12% 的碳排放量,对固碳减排起着至关重要的作用,如 Hernandez 等<sup>[35]</sup>和 Zhang 等<sup>[36]</sup>人通过研究,发现生物炭的添加有助土壤有机碳储存,土壤碳汇存在叠加效应。“储量”,2015 年 12 月联合国发布了《世界土壤资源状况》土壤功能面临十大威胁报告,阐述了土壤有机碳丧失一大威胁,明确了稳定土壤有机碳储量的行动重点,表明碳储量、碳库估算等基础研究得到重视。同时印度、尼日利亚等一些发展中国家在土壤有机碳领域开展土壤有机碳储量估算与分布等基础研究工作越来越多<sup>[37-39]</sup>。

总的来说,国际土壤有机碳领域与生物炭、碳储量和土地利用变化的相关研究有持续增加的趋势。除此之外,随着经济发展,国际合作密切,发展中国家在国际土壤有机碳研究中发挥着重要作用。

表 2 1991—2018 年国际土壤有机碳研究前 20 位突变关键词

开始年份	结束年份	突变强度	关键词
1992	2010	67.2649	耕种
1992	2005	61.8121	吸附
2014	2018	52.1212	中国
2016	2018	44.3653	生物炭
2016	2018	39.7746	修正案
1992	2009	39.0318	吸附作用
2014	2018	36.5183	储量
2004	2009	30.5063	有机质
2000	2009	29.1056	模型
1995	2003	29.0578	草地
2013	2016	28.8907	机理
2014	2015	25.5475	稳定性
2013	2018	25.107	土地利用变化
1991	2000	24.0241	水
1991	1999	23.9186	输出
2000	2008	23.6077	颗粒
1997	2007	22.7457	二氧化碳
1995	2007	22.0996	提取方法
1991	2000	21.9043	种植
1993	1999	21.767	有机酸

3 国内土壤有机碳研究进程

国内相关领域起步较晚,最早可追溯到 1981 年安战士用水合热法测定土壤有机碳<sup>[40]</sup>。为与国际同期研究进行对比分析,将国内土壤有机碳的发展过程同样划分为 1993—2000 年、2001—2010 年、2011—2018 年 3 个阶段。从图 1 可以看出,3 个发展阶段发

文量分别占国内总发文量的 8.0%，30.3%，68.9%，呈现飞速增长趋势，特别是第三阶段的文献数量远超过前两个阶段，表明 2011—2018 年是国内土壤有机碳研究的重要时期。随时间的推进，文献计量图谱的节点与聚类词增多，节点之间连线增强，交叉性增强。研究热点由熟制、碳循环、土地利用变化、空间分异到碳储量、有机碳组分和农田管理的转变，表明国内土壤有机碳的研究由农业生产与发展为主的基础研究转向土壤有机碳的循环与分布的研究，目前土壤碳储量和农田碳汇的相关研究是热点。

3.1 以农业生产与发展为主的土壤有机碳基础研究时期

1993—2000 年是国内土壤有机碳研究萌芽时期，与国际同期相比，国内该领域文章相对较少。仅检索到 24 篇，因数据量少无法进行 Citespace 分析，但通过知网关键词聚类不难看出，这一时期的高频词集中在“全球变化”、“有机无机复合体”和“碳循环”(表 3)。中国是农业大国，早期人们主要关注农田土壤有机碳变化对农业发展的影响，因此，这一时期研究的侧重点是人工管理模式下农田生态系统的土壤有机碳的变化，主要集中在不同的复熟制度和农田管理措施下土壤有机碳消长平衡，土壤理化性质及肥力变化<sup>[41-42]</sup>。全球变化与碳循环的研究也得到关注，但早期的研究基本处于定性认识。此阶段是国内土壤有机碳领域起步时期，研究内容单一，方法简单，更多倾向于与农业发展相关的基础研究，对各碳库储量与土壤碳通量，陆地碳循环的过程规律与定量分析未能较清楚的认识，缺乏对全国土壤有机碳储量全面而详细的研究<sup>[43]</sup>。

表 3 1993—2000 年国内土壤有机碳研究高频关键词

关键词	频次	年份
土壤有机碳	5	1998
有机无机复合体	2	1994
全球变化	2	2000
碳循环	2	2000
有机碳	2	2000

3.2 以土壤有机碳的循环与分布为主的研究时期 (2001—2010 年)

2001—2010 年发文量为 831 篇，约占国内总体发文量的 30.3%，文章数量增幅明显，图谱的聚类和节点连线比较集中，节点呈现一枝独大。研究热点可归纳为“有机碳矿化”、“分布特征”和“碳循环”(表 4 和图 6)，表明这一时期由以农业发展为主的土壤有机碳基础研究逐渐开始转向土壤有机碳的空间分布研究。

我国学者对陆地生态系统碳循环关注较多，尤其是土壤碳循环。起初主要研究草原生态系统碳循环，

而后不少学者对农田生态系统的土壤碳循环机制进行探索<sup>[44]</sup>。李凌浩等<sup>[45]</sup>采用 Century 模型对内蒙古锡林河流域草原生态的碳流量和周转速度等进行估算，表明碳素输入略大于输出；颀鹏等<sup>[46]</sup>通过碳转化系数对甘肃河西农田生态碳源/汇进行估算。近年来，随着 3S 技术的发展，宏观尺度上土壤有机碳库定量估算成为热点，通过 GIS 法研究土壤有机碳的空间分布特征与空间异质性越来越受到关注，如周成虎等<sup>[47]</sup>通过第二次全国土壤普查资料和 1：400 万的土壤类型图绘制了中国土壤有机碳密度的空间分布图。孙维侠等<sup>[48]</sup>和曾永年等<sup>[49]</sup>也采用同样的方法对东北地区和黄河源地区的土壤有机碳空间分布进行了分析评价。此外，自然和人类活动对土壤有机碳矿化的影响也得到广泛关注，主要集中于对土壤有机碳矿化的影响，包括对矿化速率、强度及累积矿化量的影响。研究表明温度的增加会加速矿化，水分的增加会增大累积矿化量<sup>[50]</sup>；土地利用方式的转变导致有机碳含量下降，矿化速度和累积矿化量也会相应降低<sup>[51]</sup>。

表 4 国内土壤有机碳研究不同阶段前 10 位高中心性关键词

2001—2010 年			2011—2018 年		
关键词	中心性	频次	关键词	中心性	频次
有机矿化碳	0.44	14	土壤类型	0.31	3
城市土壤	0.33	8	土壤有机碳含量	0.30	29
土壤	0.28	56	有机碳储量	0.28	38
碳循环	0.28	33	碳密度	0.28	32
空间变异	0.26	11	秸秆还田	0.28	43
沼泽湿地	0.26	6	颗粒有机碳	0.26	17
活性有机碳	0.25	22	耕作方式	0.26	8
空间分布	0.24	21	土壤理化性质	0.26	29
矿化	0.24	14	固碳潜力	0.25	18
黑土	0.21	38	土壤有机碳组分	0.25	17

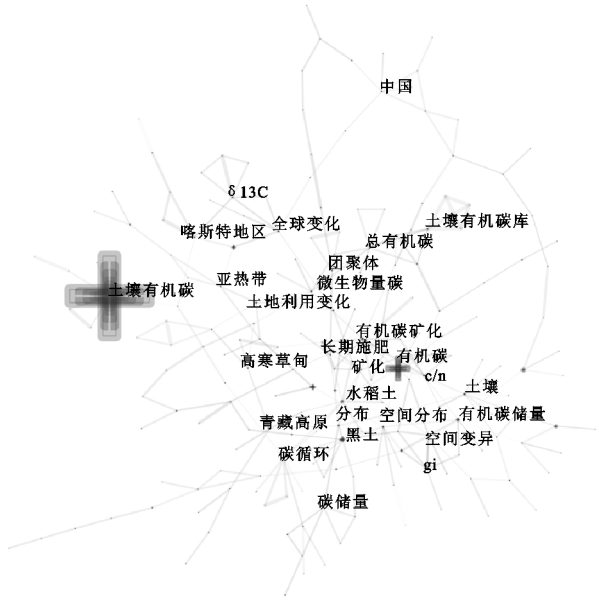


图 6 2001—2010 年国内土壤有机碳关键词聚类知识图谱



这一阶段是土壤有机碳研究的上升期,主要针对特定地区和生态群落的土壤有机碳含量、密度、储量和空间分异进行表征与分析。但试验基础上的小尺度碳密度测定由于空间异质性而难以在区域大尺度上运用,地统计学与土壤类型法结合往往因缺少土壤容重与黏粒数据而使土壤有机碳估算精度降低。

3.3 以土壤有机碳储量、农田碳汇和有机碳组分为主的研究时期(2011—2018 年)

2011—2018 年发文量为 1 892 篇,约占总体的 68.9%,文章数量远超过前两个阶段,聚类和节点明显多于前一个阶段,节点之间的连线也有所增强,表明这一时期国内土壤有机碳的研究发展快速。研究热点可归纳为有机碳储量、地统计学、有机碳组分和土地利用等(表 4 和图 7)。

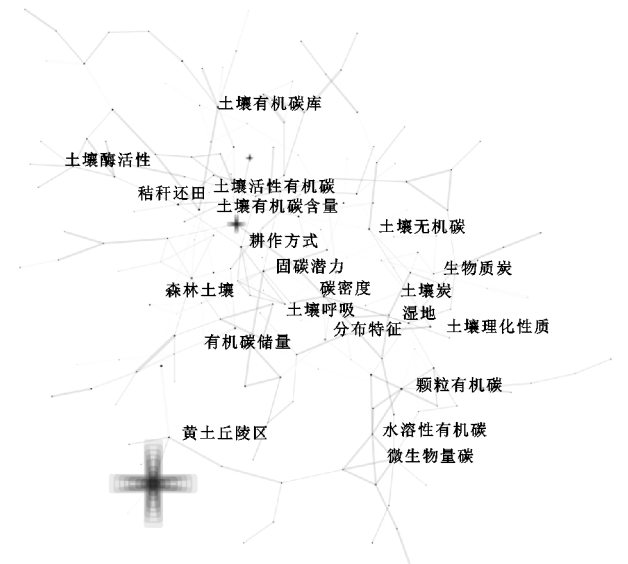


图 7 2011—2018 年国内土壤有机碳关键词聚类知识图谱

与国际同时期相比,土壤有机碳储量的估算也成为这一时期国内研究热点,但在估算方法的选择上,国际上采用了目前较先进的高光谱技术预测土壤有机碳含量,如 Cambou 等<sup>[52]</sup>利用可见和近红外反射光谱预测土壤有机碳储量,说明土壤有机碳光谱数据的获取可能是解决土壤有机碳储量数据缺乏的有效方案。而国内多采用土壤类型法与地统计学结合,如苗正红等<sup>[53]</sup>利用 GIS 技术对表层土壤有机碳储量的变化进行表征。随着国家不断推进林业方面的碳汇管理政策,有关土壤碳组分的研究逐渐进入人们视野。不少学者对活性有机碳组分的影响因子和土壤碳组分的划分进行了广泛的探究<sup>[54-56]</sup>。活性有机碳组分的影响因子主要包括土地利用和施肥管理等人为因子以及水热条件和海拔等自然因子,碳组分常以土壤碳的分解速度而划分为活性、慢性和惰性碳库。此外,这一时期农田土壤有机碳的问题依旧是研究热

点,但与早期相比,除关注农业发展的现实意义外,农田土壤的生态意义成为更突出的焦点。农田土壤的固碳效应、碳汇潜力和农耕措施优化等方面的研究不断涌现<sup>[57-59]</sup>,农田土壤碳库因其周转速度快,因而在维持全球碳平衡中逐渐发挥重要作用。

2011—2018 年是我国土壤有机碳飞速发展的重要时期,研究主题与研究热点鲜明,研究内容逐渐集中,并且在农田有机碳研究领域逐渐形成了自身的研究特色。但高科技数字化技术应用较少,研究方向虽紧跟国际前沿水平,但引导国际研究新方向的原创性研究结果较少<sup>[60]</sup>。

3.4 研究前沿与趋势

采用突变词检测算法探究国内土壤有机碳科学领域发展的前沿趋势,共出现 35 个突变词,选取了前 20 位(表 5)。从突变的时间序列来看最长是“碳循环”,这也验证了国内早期土壤有机碳的研究多与碳循环有关。掌握土壤有机碳库的变化机理与过程,控制土壤有机碳循环,使土壤成为有效的碳汇载体一直是气候变化与碳循环研究的重点和难点<sup>[61]</sup>。而从最新突现词“生物炭”、“土壤有机碳组分”、“土壤微生物”、“土壤碳库”和“土壤碳库管理指数”等可以看出目前研究趋势集中在生物炭、土壤有机碳组分和土壤有机碳库管理与估算 3 个方面。与国际相比同在生物炭方面,开展了诸如生物炭对土壤有机碳及其矿化的影响研究<sup>[62]</sup>。虽同样关注土壤有机碳库的变动,碳储量的估算,但对土壤有机碳组分开展了更加细致的研究。

表 5 1993—2018 年国内土壤有机碳研究前 20 位突变关键词

开始年份	结束年份	突变强度	关键词
2004	2008	10.3916	黑土
2015	2018	7.6933	生物炭
2015	2018	6.6552	有机碳组分
2000	2007	6.1751	碳循环
2014	2018	6.1306	土壤微生物
2009	2013	6.0926	免耕
2014	2016	5.4212	碳储量
2011	2013	5.3667	湿地
2013	2018	5.343	碳库管理指数
2004	2010	5.3385	中国
2010	2013	5.3146	土壤微生物量碳
2016	2018	5.1368	有机肥
2005	2011	4.9383	气候变化
2000	2009	4.9315	全球变化
2007	2012	4.876	土地利用类型
2004	2011	4.8019	土地利用变化
2016	2018	4.7074	激发效应
2012	2014	4.6029	黄土丘陵区
2015	2018	4.5523	土壤有机碳组分
2014	2016	4.5218	地统计学

## 4 国内外对比分析

从发展阶段来看,国际土壤有机碳的研究已有百年的发展历史,近30 a经历了土壤碳动态基础研究、环境变量影响研究到土壤固碳封存研究的转变,由进步发展阶段转向了系统稳定发展阶段。国内土壤有机碳的研究发展阶段仅有三四十年的历史,因而经历了起步阶段到进步发展阶段,表明国内土壤有机碳的研究框架与体系正在逐步完善。

从研究内容来看,由于处于不同的发展阶段,国际和国内土壤有机碳的研究内容存在差异。纵观国际土壤有机碳发展历程,以土壤有机碳的循环、分解、宏观估算,全球变化对土壤有机碳的响应以及人类活动对土壤有机碳动态变化的双重驱动为主要内容。国内则以农业生产过程中的土壤有机碳的组分、结构和储量变化,土壤有机碳的空间分布与表征为主要内容。目前关注的焦点是碳库估算与管理以及农田管理对其影响的相关研究。

从研究尺度来看,国际上宏观大尺度与微观机理并重,全球或跨地区为主的大尺度土壤碳库的估算逐渐发展,同时揭示土壤有机碳的物质循环、分子结构和团聚体分布等微观水平研究不断增加。国内则更加倾向于宏观尺度的研究,响应国家政策发展,以全国、大区域、地形区为主,揭示宏观特征,为生态文明建设服务。

从研究导向来看,国际土壤有机碳的研究以生态环境问题为导向的现象和机理研究为主,涉及到土壤有机碳的吸附、碳循环对陆地增温的响应、土地流转对土壤有机碳的影响等研究;而国内更加倾向于以农业发展的实践导向,注重解决实际问题的研究。

综合来看,由于国内相关领域起步晚,发展过程相对滞后。近十年来,国内的相关研究跟踪国际前沿,研究内容分散,未能形成系统体系。但我国土壤有机碳的研究独具地方特色,更加关注农业生产与管理对碳循环影响。目前,国内土壤有机碳领域正处于进步发展阶段,未来应该在加强土壤有机碳基础研究的同时,构建和完善我国土壤有机碳研究体系,领跑国际研究前沿。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

本文借助文献计量法对近30 a国内外土壤有机碳文献的关键词的聚类、中心性和突变性进行统计,分析国内外研究热点和前沿,对比了国内外研究差异。根据关键词的知识图谱和发文量分析表明国内外土壤有机碳的研究逐年增多,年均文献数量增幅明

显,学科交叉与融合逐渐增强,高新技术和数字化手段逐渐被应用,土壤有机碳的研究框架与体系逐步完善。由于国内相关研究起步晚,与国际研究领域存在一定差距,研究热点和内容跟踪国际前沿水平,但近年来文献研究发展迅速,在追赶国际发展前沿的同时逐渐形成独具地方特色的土壤有机碳的研究体系。

总体上国内外在研究热点、尺度、问题导向及发展阶段方面存在区别与联系,具体有以下几点:(1)发展阶段,国外处于领跑,国内处于跟跑的阶段。国际土壤有机碳的研究进入稳定发展时期,而国内正处于进步发展时期。我国土壤有机碳的研究与国际存在一定差异,研究热点与研究方法跟踪国际水平,领跑国际科学前沿的研究内容较少。(2)研究热点,国外相关研究起步早,研究热点具体延续性,研究的焦点围绕着生态环境变化和全球变化的相关问题开展;国内发展过程稍有滞后,关注的焦点为农业生产与发展相关研究,注重土壤有机碳基本特征的表征。(3)研究尺度,国际倾向于微观机制研究,近年来全球宏观大尺度研究不断涌现;而国内更加倾向于揭示宏观特征,为政府和地方政策服务。(4)研究趋势,由于国内外研究机构的交流合作的进一步深入,目前国内外土壤有机碳的研究趋势都转向了土壤有机碳储量和农业管理为核心的土壤固碳封存的相关研究。

综合来看,我国土壤有机碳的研究整体上处于跟跑状态,在研究方法、视角和原创性稍有落后。我国是农业大国,农田土壤碳汇越来越受到关注,在未来土壤有机碳的研究中,我国应当在农田土壤固碳相关方面领跑国际前沿水平。

### 5.2 展望

基于国内外各阶段研究特点的分析,发现国内外土壤有机碳的研究取得了飞速的发展,但土壤有机碳领域的发展仍存在一些不确定性,未来应该在以下几个方面加强研究:

(1)建立可靠有效的土壤有机碳储量估算技术标准与估算方法。长久以来土壤有机碳的定量估算受到估算方法、估算深度和野外监测标准不统一的影响,导致估算结果与数据间的差异较大,从而导致对区域和全球数据汇总与耦合存在困难。未来的土壤有机碳估算研究应借鉴多学科方法,结合多源数据,通过室内试验与长期野外监测,开展不同估算方法下结果的对比验证,建立可靠有效的监测标准和估算方法,以提高估算结果的精确性和可对比性。

(2)加强土壤碳循环与全球气候变化的关系研究。碳循环问题是大气圈、岩石圈、生物圈互相作用、互相影响的结果,因而需要明确碳循环的内部与外部



环境相互转换机理,各环节的碳收支平衡等问题。基于此,应开展全球气候变化下的土壤碳循环的长期定位监测与观测试验,对碳循环过程进行量化研究,为应对气候变化提供科学依据。

(3) 开展不同耕作措施下农田土壤固碳潜力研究。农田土壤有机碳库可在短期内发生变化,对调节气候变化具有重要意义,一直以来我国精耕细作的农业发展方式导致土壤有机碳损失严重,因此我国农田具有更大的固碳潜力。由于土壤环境的空间异质性和区域环境的差异,难以对固碳效率进行合理评价。应该建立农田土壤固碳潜力计量体系,将宏观土壤有机碳的周转和微观土壤动态相结合,分析土壤有机碳动态变化,同时优化经营管理措施,增加土壤碳汇能力。

#### 参考文献:

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2):151-163.
- [2] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].*生态学报*,2007,27(6):2642-2650.
- [3] Wilding L P, Lin H. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience[J]. *Geoderma*, 2006, 131(3/4):257-274.
- [4] 陈超美,陈悦,侯剑华,等. Citespace II :科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J].*情报学报*,2009,28(3):401-421.
- [5] 谭清月,许明祥,李彬彬,等.中国生态系统服务研究发展过程解析[J].*水土保持研究*,2018,25(4):330-337.
- [6] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3):279-293.
- [7] Coleman K, Jenkinson D S. C-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil[M]// *Evaluation of soil organic matter models*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [8] Kelly R H, Parton W J, Crocker G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the century model[J]. *Geoderma*, 1997, 81(1/2):75-90.
- [9] Studdert G A. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4):1496-1503.
- [10] Moraes J L, Cerri C C, Melillo J M, et al. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(1):244-247.
- [11] Rapalee G, Trumbore S E, Davidson E A, et al. Soil carbon stocks and their rates of accumulation and loss in a boreal forest landscape[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(4):687-701.
- [12] Taylor L A, Arthur M A, Yanai R D. Forest floor microbial biomass across a northern hardwood successional sequence[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3):431-439.
- [13] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Soil Research*, 1992, 30(2):195-207.
- [14] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(2):460-466.
- [15] Alvarez R, Diaz R A, Barbero N, et al. Soil organic carbon, microbial biomass and CO<sub>2</sub>-C production from three tillage systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 33(1):17-28.
- [16] Turner I B L, D Skole, G Fisher, et al. Land use and land cover change: science/research plan[Z]. Stockholm and Geneva:IGBP Repoa No.35 and HDP Repoa No.7,1995.
- [17] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, et al. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest[J]. *Nature*, 1999, 400(6739):56-58.
- [18] Richard T. Conant. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(2):343-355.
- [19] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks-a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(4):1658-1670.
- [20] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1/2):63-79.
- [21] Zhou X Y, Zhang C Y, Guo G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: a review[J]. *the Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7):1867-1874.
- [22] Knorr W, Prentice I, House J, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. *Nature*, 2005, 433(7023):298-301.
- [23] 崔利论,袁文平,张海成.土壤侵蚀对陆地生态系统碳源汇的影响[J].*北京师范大学学报:自然科学版*,2016, 52(6):816-822.
- [24] Lal R, Pimentel D. Soil erosion: a carbon sink or source[J]. *Science*, 2008, 319(5866):1040-1042.
- [25] Minasny B, Malone B P, McBratney A B, et al. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292:59-86..
- [26] 程琨,潘根兴.“千分之四全球土壤增碳计划”对中国的挑战与应对策略[J].*气候变化研究进展*,2016,12(5):457-464.
- [27] Hamdi S, Moyano F, Sall S, et al. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 2013,58:115-126.
- [28] Aitkenhead M J, Coull M C. Mapping soil carbon stocks across Scotland using a neural network model[J]. *Geoderma*, 2016,262:187-198.
- [29] Guo L, Zhang H, Shi T, et al. Prediction of soil organic carbon stock by laboratory spectral data and airborne hyperspectral images[J]. *Geoderma*, 2019,337:32-41.
- [30] Crowther T W, Todd-Brown K E, Rowe C W, et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming[J]. *Nature*, 2016,540(7631):104-108.
- [31] Deng L, Zhu G, Tang Z, et al. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2016,5:127-138.
- [32] 李杰. Citespace:科技文本挖掘及可视化[M].北京:首都经济贸易大学出版社,2016.
- [33] Liu B, Banks M K, Schwab P. Effects of soil water content on biodegradation of phenanthrene in a mixture of organic contaminants[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2001,10(6):633-658.
- [34] Ke Sun, Bo Gao, Guixiang Zhang, et al. Sorption of atrazine and phenanthrene by organic matter fractions in soil and sediment [J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(12):3520-3526.
- [35] Hernandez-Soriano M C, KerréB, Kopittke P M, et al. Biochar affects carbon composition and stability in soil; a combined spectroscopy-microscopy study[J]. *Scientific Reports*, 2016,6(25127):1-13.
- [36] Zhang S, Wang L, Wei W, et al. Enhanced roles of biochar and organic fertilizer in microalgae for soil carbon sink[J]. *Biodegradation*, 2018,29(4):313-321.
- [37] Hinge G, Surampalli R Y, Goyal M K. Prediction of soil organic carbon stock using digital mapping approach in humid India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018,77(5):160-173.
- [38] Sahu S C, Kumar M, Ravindranath N H. Carbon stocks in natural and planted mangrove forests of Mahanadi Mangrove Wetland, East Coast of India[J]. *Current Science*, 2016,110(12):2253-2260.
- [39] Akpa S I C, Odeh I O A, Bishop T F A, et al. Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria[J]. *Geoderma*, 2016,271:202-215.
- [40] 安战士.土壤有机碳的水合热测定法[J].*土壤通报*, 1981(2):14.
- [41] 祖守先,张友金,张福星,等.浙江省两年五熟制 t 粮田的碳素平衡研究[J].*土壤通报*,1995,26(7):18-20.
- [42] 马成泽,周勤.不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布[J].*土壤学报*,1994,31(1):34-41.
- [43] 金峰,杨浩,赵其国.土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J].*土壤*,2000,32(1):11-17.
- [44] 赵荣钦,秦明周.中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J].*生态与农村环境学报*,2007,23(2):1-6.
- [45] 李凌浩,刘先华.内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究[J].*植物学报:英文版*,1998,40(10):955-961.
- [46] 颀鹏,蔺海明,黄高宝,等.河西绿洲农田生态系统碳源/汇的时空差异研究[J].*草业学报*,2009,18(4):224-229.
- [47] 周成虎,周启鸣,王绍强,等.中国土壤有机碳库空间分布的分析与估算[J]. *AMBIO-人类环境杂志*,2003,32(1):6-12,82.
- [48] 孙维侠,史学正,于东升,等.基于 1:100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究:以中国东北三省为例[J].*地理科学*,2004,24(5):568-572.
- [49] 曾永年,冯兆东,曹广超,等.黄河源区高寒草地土壤有机碳储量及分布特征[J].*地理学报*,2004,59(4):497-504.
- [50] 刘景双,孙丽娜.温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J].*生态学杂志*,2008,27(1):38-42.
- [51] 李忠佩,车玉萍,张朝.土地利用方式转变后灰色森林土有机碳矿化的温度响应特征[J].*应用生态学报*, 2009,20(5):1020-1025.
- [52] Cambou A, Cardinael R, Kouakoua E, et al. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field [J]. *Geoderma*, 2016,261:151-159.
- [53] 苗正红,杨清臣,邱中军,等.基于 GIS 技术的土地利用变化对表层土壤有机碳储量的影响:以富锦市为例[J].*水土保持研究*,2015,22(6):19-23.
- [54] 董扬红,曾全超,李娅芸,等.黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分分布特征[J].*草地学报*,2015,23(2):277-284.
- [55] 丁咸庆,马慧静,朱晓龙,等.大围山不同海拔森林土壤有机碳垂直分布特征[J].*水土保持学报*,2015,29(2):258-262.
- [56] 赵鑫,宇万太,李建东,等.不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J].*应用生态学报*,2006,17(11):2203-2209.
- [57] 李洁静,潘根兴,李恋卿,等.红壤丘陵双季稻稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J].*农业环境科学学报*,2009,28(12):2520-2525.
- [58] 刘晶晶,张阿凤,冯浩,等.不同灌溉量对小麦—玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J].*应用生态学报*, 2017,28(1):169-179.
- [59] 姜蓝齐,臧淑英,张丽娟,等.松嫩平原农田土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J].*生态学报*,2017,37(21):7068-7081.
- [60] 宋长青,谭文峰.基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤科学发展过程解析[J].*土壤学报*,2015,52(5):957-969.
- [61] 王岩松,李梦迪,朱连奇.土壤有机碳库及其影响因素的研究进展[J].*中国农学通报*,2015,31(32):123-131.
- [62] 张洪培,李秀云,沈玉芳,等.生物质炭对农田土壤有机碳及其矿化影响的研究进展[J].*西北农业学报*,2018,27(4):459-468.