

基于科学知识图谱谈土壤有机碳研究进展*

唐浩竣¹ 李海萍^{1†} 陈文悦² 唐家亮³

(1 中国人民大学环境学院, 北京 100872)

(2 中国地质大学(北京), 北京 100083)

(3 山东省长岛县第一实验学校, 山东烟台 265800)

摘 要 以“土壤有机碳”为主题词, 从ISI Web of Science 数据库核心集中检索出1975—2018年文献2 258篇, 运用CiteSpace知识图谱分析工具, 对合著国家、作者、机构、学科领域、文献共被引网络以及关键词共现网络等进行可视化分析, 对土壤有机碳的研究进展及演变趋势进行了图谱解读和追踪分析。结果表明: (1) 土壤有机碳研究经历了起步、发展、稳定三个阶段; (2) 土壤有机碳研究具有很强的学科交叉性, 涉及环境生态学、环境科学、农业综合、农艺学、化学、农学及生态学等众多学科领域; (3) 当前的研究方向主要为土壤有机碳储量与稳定土分离; (4) 研究趋势已转为碳储量与耕地管理研究; (5) 中国土壤有机碳研究起步较晚但发展迅速, 在国际上处于重要地位。

关键词 科学知识图谱; CiteSpace; 土壤有机碳; 可视化分析

中图分类号 S15 **文献标识码** A

土壤有机碳(SOC, soil organic carbon), 是通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称^[1], 是土壤养分转化的核心, 不仅表征土壤截留碳的能力, 也反映了直接影响土壤肥力保持与提高的有机质含量。有机碳的减少间接导致有机质含量减少, 从而引起土壤团粒结构松散、微生物减少及重金属活化等问题, 进而影响到农作物的产量与质量, 因此, 土壤有机碳储量既是评价土壤肥力的一项重要指标, 也是全球碳汇的重要组成部分之一。

科学知识图谱是以知识域为对象, 显示科学知识的发展进程与结构关系的图像, 既是可视化的知识图形, 又是序列化的知识谱系, 显示了知识单元或知识群之间网络、结构、互动、交叉、演化或衍生等诸多复杂关系^[2]。知识图谱分析通过分析

文献、科学家和关键词等知识单元的相似性及其测度, 从而分析、构建、绘制和显示知识间的相互关系, 并挖掘出其中所蕴含的新知识。

目前, 知识图谱分析软件有十几种, 其中CiteSpace是基于科学计量学、数据可视化理论发展起来的一款引文可视化分析软件。国内通过CiteSpace分析土壤有机碳研究文献的成果渐增, 如土地利用对土壤有机碳影响的热点与进展分析^[3], 国外土地利用与碳排放知识图谱分析^[4], 国外此类文章则较少。这些文献计量研究大多局限于一种因素的影响研究, 覆盖领域有限。本文将以土壤有机碳为主题词, 使用知识图谱分析工具, 对合著国家、作者、机构、学科领域、文献共被引网络以及关键词共现网络等进行全面的可视化分析和文献综述, 以反映土壤有机碳的最新研究进展。

* “中国人民大学2018年度‘中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金’”资助 Supported by the Fund for Building World-class Universities (disciplines) of Renmin University of China. Project No. 2018

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lhping@ruc.edu.cn

作者简介: 唐浩竣(1992—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统应用以及土壤有机碳储量估算研究。

E-mail: tanghaojun_gis@163.com

收稿日期: 2018-06-16; 收到修改稿日期: 2018-09-12; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-11-02

1 材料与方法

1.1 数据来源

文献计量分析数据来自ISI Web of Science数据库核心集,通过主题词“soil organic carbon”进行检索,时间跨度为1975—2018年,因只针对学术论文,故文献类型为“article”,从检索结果中筛选出与“土壤有机碳”相关的文献共2 258篇(数据截至时间为2018年4月10日),命名为CiteSpace可识别的download_soil.txt,作为分析的数据基础。由于Citespace软件对CNKI数据库的支持尚不完善,分析功能有限,因此,本文未将CNKI中文文献纳入分析数据中。

1.2 研究方法

CiteSpace基于共引分析理论(co-citation)和寻径网络算法(pathFinder)对特定领域文献集合进行计量,以探寻出科学领域演化的关键路径及其知识拐点,并通过梳理关键文献,量化文献之间的相应特征,形成对学科演化潜在动力机制

的分析和学科发展前沿的探测^[2]。CiteSpace主要分为合作网络分析(作者、国家、机构合作)、共现网络分析(特征词、关键词、学科类别)和共被引分析(文献、作者、期刊共被引)等功能模块。

将检索得到的数据处理后导入CiteSpace,将时间段(Time Slicing)设为1975—2018年,跨度(Year Per Slice)为1年,节点类型(Node Types)依次选择国家(Country)、作者(Author)、机构(Institution),年被引频次排名(Top N)为50,分别生成国家、作者和机构图谱,并进行基本特征、合作特征、文献共被引及关键词共现等知识图谱分析。

2 结果与讨论

2.1 发文数量时间特征

发文数量及其发表年份可反映研究专题的动态变化,对检索结果进行统计制图,见图1。

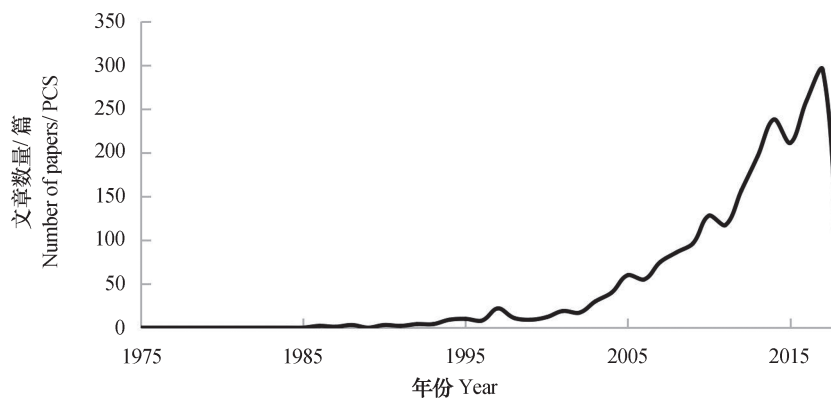


图1 文献基本特征

Fig. 1 Basic features of the literature

图1显示,早期文献可追溯至1986年,之前则寥寥无几,总量上,2004年之前年平均发文量不足50篇,除2006、2011和2015年略有下降外,年平均发文数量整体呈上升趋势,表明土壤有机碳研究逐渐成为热点。

2.2 合作特征空间分布

合作图谱可识别出某研究领域的学者、国家或机构间的社会关系,既可为评价其学术影响力提供参考,也便于发现值得关注的学者和机构。

图2的国别图谱显示,共有56个国家间具有不

同程度的合作。

统计中介中心性较高的前10个国家,列于表1。

表1中的前三名是美国、澳大利亚和德国,最早发文年份均在2000年前,美国的中介中心性最高合作年份最早,除英、法外的其余国家最早发文年份均在2000年之后,中国发文年份较晚但合作频数高于美国,且中介中心性较其余6个国家高,表明中国土壤有机碳的研究正逐步逼近甚至超过起步较早的英、法等国并快速发展。

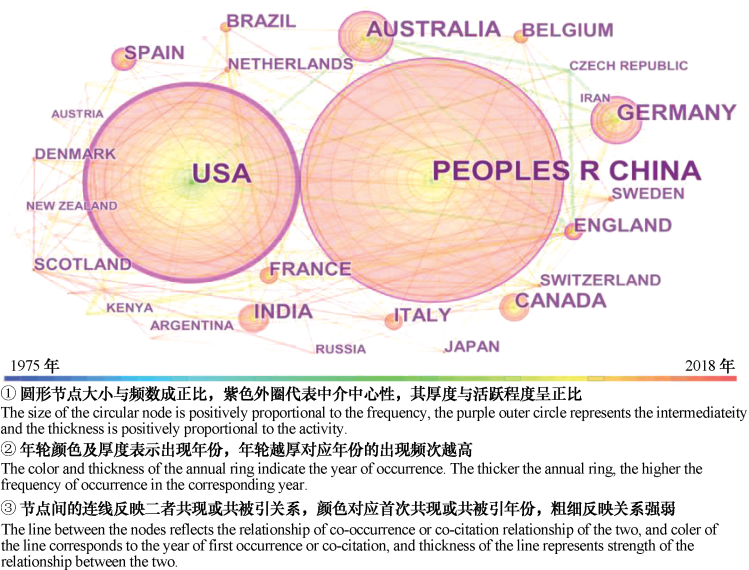


图2 国家合作特征

Fig. 2 Network of co-authors' countries

表1 1975—2018年国别合作特征及频次统计

Table 1 Country Cooperation Features and Frequency Statistics of the period from 1975 to 2018			
国家 Country	中介中心性 Centrality	频数 Frequency	首发年份 Starting year
美国 USA	0.46	613	1993
澳大利亚 Australia	0.20	185	1995
德国 Germany	0.14	170	1997
中国 China	0.12	735	2003
西班牙 Spain	0.12	85	2007
英国 England	0.11	81	1997
意大利 Italy	0.10	81	2007
印度 India	0.07	116	2003
苏格兰 Scotland	0.06	46	2007
法国 France	0.05	84	1996
加拿大 Canada	0.05	125	2000
荷兰 Netherlands	0.04	38	2007
巴西 Brazil	0.03	70	2002
比利时 Belgium	0.03	85	2004

输出的作者图谱表明，土壤有机碳研究者分布广泛且独立性较强，并有小范围合作。

选取中介中心性排名前40的作者，统计其文章频数、中介中心性及最早合作年份等定量数据列于表2。

表2显示，作者间联系最紧密的是Coleman K，发文10篇，首发时间2007年，中介中心性0.28，

其次是Li Y，发文8篇，2012年首发，中介中心性0.22，Lal R、van Wesemael B虽发文较多且起步早，但中介中心性较低，说明与其他作者的联系较单一。中心性为0的Zhao Y C、Lozano Garcia B等仅专注于独立研究。中国学者共30名，占75%，体现了我国学者的较高参与度，表明我国的土壤有机碳研究呈蓬勃发展之势。

表2 1975—2018年作者合作特征及频次统计

Table 2 Author cooperation characteristics and frequency statistics of the period from 1975 to 2018							
作者 Author	中介中心性 Centrality	频数 Frequency	首发年份 Starting year	作者 Author	中介中心性 Centrality	频数 Frequency	首发年份 Starting year
Coleman K	0.28	10	2007	Baldock J A	0.05	11	2013
Li Y	0.22	8	2012	Baldock J	0.05	4	2016
Smith P	0.16	17	2007	Feng W T	0.05	3	2017
He X H	0.13	6	2014	Senapati N	0.05	2	2013
Xu M G	0.12	12	2014	Luo Y Q	0.04	10	2012
Wu J S	0.12	8	2012	Wang E L	0.04	7	2013
Lal R	0.09	54	2001	Paustian K	0.03	15	2005
Chappell A	0.09	7	2013	Cheng X L	0.03	10	2013
vanWesema-el B	0.07	24	2005	Yang X M	0.03	9	2009
Zhang Y	0.07	8	2014	Zhang J J	0.03	6	2016
Liu Y	0.07	6	2013	Xiong X	0.03	6	2014
Li S Y	0.07	2	2016	Rossel R A V	0.03	6	2008
Wang Y	0.06	14	2012	Tang C X	0.03	6	2016
Li J	0.06	7	2015	Yang J	0.03	6	2015
Liu Y L	0.06	5	2016	Luo Z K	0.03	5	2013
Killian K	0.06	4	2007	Zhu P	0.03	4	2015
Chen J	0.06	2	2017	Li H Y	0.03	4	2014
Wu L H	0.06	2	2016	Zhao Y	0.03	4	2017
Zhang W	0.05	17	2012	Zhao G	0.03	4	2013
Zhang W J	0.05	12	2010	Zhu LQ	0.03	4	2015
Zhao Y C	0	14	2005	LozanoGarcia B	0	9	2014

图3的机构图谱显示，大学发文较多，科研机构较少，中国科学院与其他机构的合作次数最高，

中介中心性也最高，表明其与外界合作频繁且联系密切。



图3 机构合作特征

Fig. 3 Network of co-authors' institutions

统计各机构发文数、首发年份和中介中心性，并选取中心性排名前10的机构列于表3。

表3 1975—2018年机构合作特征及频次统计

Table 3 Institutional cooperation characteristics and frequency statistics of the period from 1975 to 2018			
机构 Institution	中介中心性 Centrality	频数 Frequency	首发年份 Starting year
中国科学院 Chinese Acad Sci	0.61	387	2003
佛罗里达大学 Univ Florida	0.16	38	2008
阿伯丁大学 Univ Aberdeen	0.12	27	2007
科罗拉多州立大学 Colorado State Univ	0.10	39	2003
中国农业科学院 Chinese Acad Agr Sci	0.07	60	2006
西澳大利亚大学 Univ Western Australia	0.07	25	2009
英国洛桑研究院 Rothamsted Res	0.06	18	2007
美国农业部农业研究组织 USDA ARS	0.06	55	1998
鲁汶大学 Catholic Univ Louvain	0.05	35	2005
澳大利亚科工组织 CSIRO Land & Water	0.05	20	2006

表3显示，中国科学院中介中心性最高，远高于排名第二的佛罗里达大学，尽管首次发文时间不算最早，但与其他机构的合作最为活跃。

将CiteSpace与谷歌地球结合，生成合作国家的地理空间分布网络图，直观展示国家、作者、文章的地域分布关系，见图4。

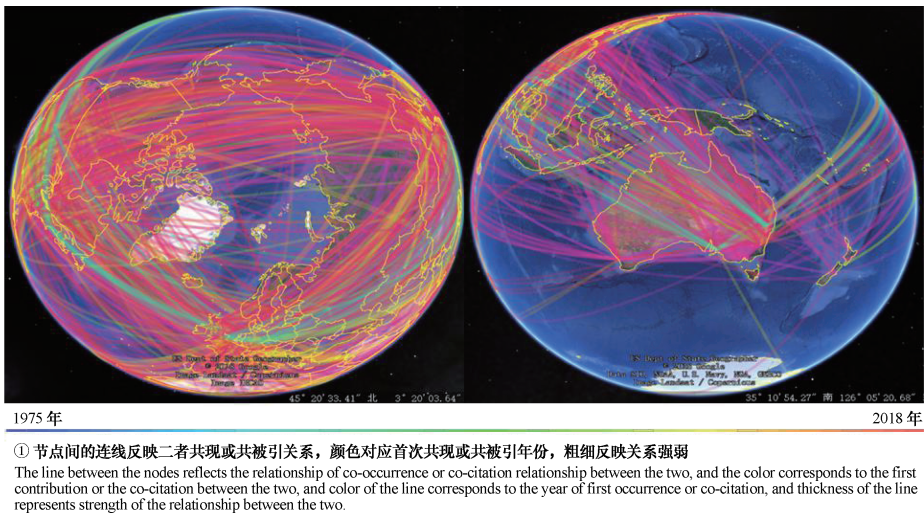


图4 国家间合作的地理分布
Fig. 4 Geographical distribution of cooperations among countries

图4显示，土壤有机碳研究不仅集中于亚、欧和北美三大地区，且区域间的联系也十分紧密，形成明显的三足鼎立之势，亚洲以中国为主要纽带，欧洲以德国为中心，美国在北美占主导。连线的密集程度也显示出澳洲的对外合作相对较弱。

2.3 学科共现特征图谱

学科共现分析可构建学科间的关联网络，揭

示交叉学科间的内在联系。图5的学科共现图谱显示，共有45个节点，表明有45个学科相互交叉渗透，163条连线代表学科间的联系，农业、土壤学、环境生态学与其他学科交叉广泛，且环境生态学的中介中心性最高，交叉也最广泛，农学、土壤学交叉次数较多但中介中心性不高，说明与其交叉的领域有限。



图5 学科共现特征

Fig. 5 Co-occurring subject categories

进一步统计各学科的共现次数、首次出现年份和 中介中心性，选取中心性排名前10的学科列于表4。

表4 1975—2018年学科共现特征及频次统计

Table 4 Co-occurrence characteristics and frequency statistics of the period from 1975 to 2018

学科 Category	中介中心性 Centrality	频数 Frequency	首次出现年份 Starting year
环境科学与生态学Environmental Sciences & Ecology	0.43	697	1994
环境科学Environmental Sciences	0.40	570	1997
农业，多学科Agriculture, Multidisciplinary	0.36	154	1995
农艺学Agronomy	0.22	220	1991
化学Chemistry	0.22	59	1991
农学Agriculture	0.16	1383	1988
生态学Ecology	0.11	280	1994
科学与技术Science & Technology	0.10	123	1997
土壤学Soil Science	0.09	1136	1988
环境研究学Environmental Studies	0.09	16	2007

学科共现显示，土壤有机碳研究的学科分布主要集中在环境生态学、环境科学、农业综合、农艺学、化学、农学和生态学等领域，除环境领域出现较晚外，其余学科均早于2000年，说明学科交叉时间久远且复杂。

2.4 关键词共现图谱

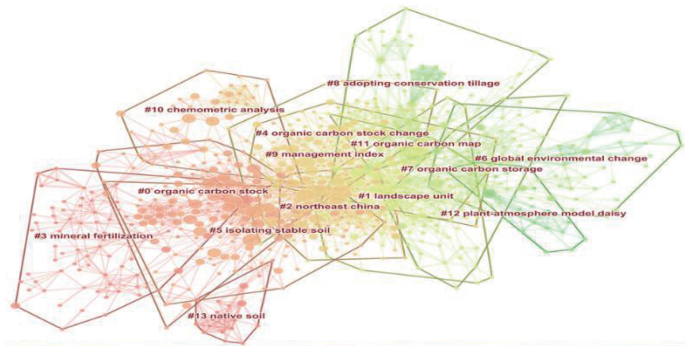
关键词是文章主旨的精简表达，代表了文章的主要研究内容，关键词共现分析有利于识别研究主题及其演变。将节点类型选为关键词，裁剪方式设为Path Finder（寻径裁剪），得到关键词共现图

谱，见图6。

图中共249个节点，大小反映关键词出现频次，最大的是“物质”（matter），其他依次为“封存”（sequestration）、“土壤有机碳”（soil organic carbon）、“氮”（nitrogen）、“动力学”（dynamics）、“管理”（management）、“存储”（storage）、“土地利用”（land use）、“气候变化”（climate change）和“耕作”（tillage）等，土壤有机碳出现频次位居第三，是较重要的一个研究专题。

表5 基于时区视图的关键词动态变化及研究热点趋势特征

时间跨度 Time slicing	居前10 的关键词及其频率 Top 10 keywords and its frequency		关键词动态变化 Keywords change	研究趋势特征 Research trend characteristics
1991—2002	Matter (886) Sequestration (667) Soil organic carbon (557) Nitrogen (486) Dynamics (399)	Management (200) Storage (320) Tillage (230) Microbial bioma (194) Turnover (124)	物质 (matter) 转换 (turnover)	土壤有机碳的转换、动态、封存等理论与方法
2003—2012	Landuse (319) Climate change (308) Landuse change (209) Stock (196) China (189)	Agricultural soil (160) Quality (151) Vegetation (146) Impact (126) Forest soil (112)	关键词频次减少，研究出现分化迹象并向多个领域渗透	土壤有机碳在不同领域中的应用，自2003年开始土壤有机碳成为中国研究热点
2013—至今	Spatial distribution (19) Stabilization mechanism (12) Paddy soil (12) Long term fertilization (11) Microbial community (10)	Ecosystem service (10) Plantation (9) Australia (7) Crop yield (6) Random forest (4)	关键词频次与中心度进一步下降，研究领域出现分支，侧重于方法上的创新	多种新技术应用于土壤有机碳研究领域，学科间的相互联系加强，研究结果应用于众多学科领域



① 圆形节点大小与频数成正比，紫色外圈代表中介中心性，其厚度与活跃程度呈正比
The size of the circular node is positively proportional to the frequency, the purple outer circle represents the intermediateness and the thickness is positively proportional to the activity.
② 年轮颜色及厚度表示出现年份，年轮越厚对应年份的出现频次越高
The color and thickness of the annual ring indicate the year of occurrence. The thicker the annual ring, the higher the frequency of occurrence in the corresponding year.
③ 节点间的连线反映二者共现或共被引关系，颜色对应首次共现或共被引年份，粗细反映关系强弱
The line between the nodes reflects the relationship of co-occurrence or co-citation relationship of the two, and color of the line corresponds to the year of first occurrence or co-citation, and thickness of the line represents strength of the relationship between the two.

图7 文献共被引图谱
Fig. 7 Document co-citation network

壤有机碳的整个研究领域，致使分析结果存在一定程度的偏差。

此外，知识图谱的绘制虽然可以较好地理解学科发展的状态和机制，但仅根据检索结果对图谱进行分析必然存在一定的机械性，如果能够配合领域专家的认证和解读，结果将更为准确和客观，同时，若要对专业知识进行归纳总结，并对发展中国

家与发达国家之间的研究重点进行区分，则需要进行大量的原始文献阅读和判断分析，而文献计量分析目前还难以实现此项功能。

3 结 论

CiteSpace软件是进行知识图谱分析的有效工

表6 各群组主要研究内容及代表作者

Table 6 Main research content and representative authors of each group			
群组编号 Code	群组专题 Group topics	时间跨度 Time slicing	主要研究内容 Main research content
#0	有机碳储量	2007—2016	研究尺度多以世界为主，使用铯-137与碳库存观测数据，发现因世界农业景观的侵蚀导致全球碳汇每年减少0.12个碳元素 ^[5] ；对385份热带土地利用变化的研究，估算出主要土地利用类型变化导致的土壤有机碳储量变化 ^[6] ；植树造林对SOC储量的影响回顾，确定植树造林后恢复SOC的因素 ^[7]
#1	景观单元	1998—2010	影响土壤有机碳封存速率的相关因素 ^[8] ；土地利用类型变化对土壤有机碳储量的影响 ^[9] ；土壤有机碳保护措施，估算全球土壤有机碳封存潜力 ^[10]
#2	中国东北	2002—2012	气候变化对土壤碳储量的影响 ^[11] ；增加土壤碳汇的相关方法，量化碳汇与产量的关系 ^[12]
#3	矿物质施肥	2010—2017	土壤碳在耕作后的变化 ^[13]
#4	土壤有机碳变化	1997—2013	保护性耕作促进碳储量增加的理论质疑 ^[14] ；使用多个长期农业实验全球数据库完成了碳封存率分析，量化不同作物潜在的土壤碳封存率，估计发生封存的时间 ^[15]
#5		2003—2016	证明SOM的稳定性主要由环境、生物控制，并将这两种因素加入新的土壤碳模型 ^[16]
#6	全球环境变化	1987—2004	利用骨料和土壤有机质（SOM）分馏技术识别优先稳定土壤有机碳的SOC库，阐明森林土壤中的SOC封存机制 ^[17]
#7	土壤有机碳储存	1994—2006	利用中国第二次全国土壤普查数据和改进的土壤碳密度方法，估算土地利用引起的SOC变化，比较中国耕地和非耕作土壤有机碳的空间分布和储量 ^[18]
#8	适应性保护耕作	1994—2004	在土壤饱和度概念的框架内回顾有关SOM动力学的知识 ^[19]
#9	管理指标	1998—2009	使用一个简单的three-pool模型证明不稳定的SOC较稳定的SOC对温度更敏感 ^[20]
#10	化学计量分析	2002—2016	提出通过光谱测量土壤中的各个物质含量 ^[21]
#11	有机碳制图	1998—2008	评估抽样规模和空间信息（地形属性）如何影响土壤C的空间估计质量 ^[22]
#12	植物大气Daisy模型	1991—2003	使用来自七个长期实验的十二个数据集评估九个土壤有机碳模型，详细讨论模型性能差异的可能原因 ^[23]
#13	残积土	2008—2017	探究了了解碳与土壤有机质的相互作用关系 ^[24]

具，可以理清研究国家、作者及机构之间的合作关系，通过学科、关键词共现分析与文献共被引分析了解研究方向及前沿热点。土壤有机碳研究经历了1991—2002年的起步阶段、2003—2012年的发展阶段，以及2013年以来的稳定阶段，并且涉及多个学科，学科交叉时间可追溯至20世纪90年代，其中农业、土壤、环境领域交叉较频繁，大致可分

为储量研究和耕地管理两个发展方向及14个主题，研究前沿集中在土壤有机碳储量、矿物质施肥、分离稳定土、化学计量分析和残积土方面。目前有56个国家间存在合作关系，中国虽起步较晚，但研究者众多，发文数量也最高，中国科学院与外界的合作最紧密，是土壤有机碳领域科研的中坚力量。

表7 各组群最高被引频次

Table 7 Highest citation frequency in each group

群组编号 Code	被引频次 Frequency	作者 Author	发表年份 Publish year	中介中心性 Centrality	文献标题 Document title
#0	60	DON A	2011	0.03	Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis
#1	72	Lal R	2004	0.02	Soil carbon sequestration to mitigate climate change
#2	82	Davidson E A	2006	0.08	Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change
#3	32	Luo Z K	2010	0.02	Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis
#4	62	Baker J M	2007	0.09	Tillage and soil carbon sequestration -What do we really know?
#5	107	Schmidt M W I	2011	0.07	Persistence of soil organic matter as an ecosystem property
#6	12	Six J	2002	0	Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation
#7	19	Wu H B	2003	0.02	Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China
#8	44	Six J	2002	0.06	Review: Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils
#9	26	Knorr W	2005	0.06	Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming
#10	35	Stenberg B	2010	0	Visible and near infrared spectroscopy in soil science
#11	17	Mueller T G	2003	0.04	Soil carbon maps : Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales
#12	22	Smith P	1997	0.06	A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments
#13	8	Zimmerman A R	2011	0.02	Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils

参 考 文 献

[1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000
Huang C Y. Soil Science (In Chinese) . Beijing: China Agriculture Press, 2000

[2] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33 (2) : 242—253
Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains (In Chinese) . Studies in Science of Science, 2015, 33 (2) : 242—253

[3] 张影, 巩杰, 马学成, 等. 基于文献计量的近20多年来土地利用对土壤有机碳影响研究进展与热点. 土壤

通报, 2016, 47 (2) : 480—488
Zhang Y, Gong J, Ma X C, et al. Research progress on the impact of land use on soil organic carbon based on the bibliometric method (In Chinese) . Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47 (2) : 480—488

[4] 张苗. 国外土地利用与碳排放知识图谱分析. 中国土地科学, 2016 (3) : 51—60
Zhang M. Analysis on the knowledge mapping of foreign research on land use and carbon emission based on the CiteSpace III (In Chinese) . China Land Sciences, 2016 (3) : 51—60

[5] Oost K V, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle.

- Science, 2007, 318 (5850) : 626—629
- [6] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land - use change on soil organic carbon stocks – A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2011, 17 (4) : 1658—1670
- [7] Jérôme L, Denisa A, David P. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16 (1) : 439—453
- [8] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2010, 16 (3) : 317—327
- [9] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8 (4) : 345—360
- [10] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123 (1/2) : 1—22
- [11] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440 (7081) : 165—173
- [12] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677) : 1623—1627
- [13] Luo Z, Wang E, Sun O J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis. *Geoderma*, 2010, 155 (3) : 211—223
- [14] Baker J M, Ochsner T E, Venterea R T, et al. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 118 (1) : 1—5
- [15] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (6) : 1930—1946
- [16] Schmidt M W, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478 (7367) : 49—56
- [17] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (6) : 1981—1987
- [18] Wu H, Guo Z, Peng C. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17 (2) : 1—10
- [19] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant & Soil*, 2002, 241 (2) : 155—176
- [20] Knorr W, Prentice I C, House J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433 (7023) : 298—301
- [21] Bo S, Raphaella V R, Abdulmounem M, et al. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 2010, 107: 163—215
- [22] Mueller T. Soil carbon maps: Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (1) : 258—267
- [23] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 1997, 81 (1/2) : 153—225
- [24] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43 (6) : 1169—1179

Research Progress on Soil Organic Carbon Based on Map of Scientific Knowledge

TANG Haojun¹ LI Haiping^{1†} CHEN Wenyue² TANG Jialiang³

(1 School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

(2 China University of Geosciences (Beijing) , Beijing 100083, China)

(3 Changdao County First Experimental School, Yantai, Shandong 265800, China)

Abstract 【Objective】In order to review progresses of the research on soil organic carbon, 2 258 articles on soil organic carbon published during the period from 1975 to 2018 and pooled into the core set of the ISI Web of Science database were cited for analysis. 【Method】Based on co-citation and pathFinder, CiteSpace was adopted to evaluate the collection of documents in a specific field to explore

key paths and knowledge turning points of the evolution of the science field and collate key documents and quantify their corresponding features in the literature, so as to analyze potential dynamic mechanisms of the evolution of the discipline and search for development frontiers of the discipline. CiteSpace is composed mainly of cooperation network analysis (cooperations between authors, countries and institutions) co-occurrence network analysis (characteristic words, keywords, discipline categories) and co-citation analysis (documents, authors, co-cited journals) and some other functional modules. Data were retrieved, processed and introduced into CiteSpace, with time slicing set as 1975—2018 and Year Per Slice as 1 year; Country (Country), Author (Author) and Institution (Institution) selected as node type (Node Type) in turn; annual citation frequency (Top N) being 50 in rank; national, author and institutional maps generated and knowledge patterns, such as basic characteristics, cooperation characteristics, literature co-citation and keyword co-occurrence, analyzed. 【Result】 (1) Except for a slight decline in 2006, 2011 and 2015, the annual average number of published articles showed an overall upward trend, indicating that the research on soil organic carbon continued increasing; (2) The study on soil organic carbon has gone through three phases: initiation, development, and stabilization; (3) The study on soil organic carbon is highly interdisciplinary, involving environmental ecology, environmental science, agricultural integration, agronomy, chemistry, agricultural science, ecology, and some other disciplines; (4) The current hot spots of the research are concentrated on soil organic carbon reserves and separation and stabilization of soils; (5) Research tends to deal with management of carbon reserves and cultivated land; and (6) The study on soil organic carbon in China started quite late, but has been developing rapidly, and is now in an important position internationally. 【Conclusion】 As an effective tool for analysis of knowledge maps, CiteSpace can be used to clarify the cooperative relationships between countries, authors and institutions in the field. So far, a total of 56 countries have cooperative relations. Although China started late in the research, it has a huge number of researchers, stands on the top in number of published papers and has established close relations with other countries. The study on soil organic carbon involves a wide range of disciplines. Intercross of disciplines can be traced back to the 1990s, and the intercrossing of agriculture, soil, and environment sciences is relatively frequent. The research on soil organic carbon can be divided into 14 topics, with soil organic carbon reserves, mineral fertilization, separation of stable soils, stoichiometric analysis, and residual soil being frontiers of the research.

Key words Knowledge map; Citespace; Soil organic carbon; Visual analysis

(责任编辑: 檀满枝)