

\*\*\*\*\*  
\* 学术信息与动态 \*  
\*\*\*\*\*

DOI: 10.5846/stxb201907091439

马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 王乐, 乔成龙, 孟晨, 倪细炉. 基于 CiteSpace 的陆地生态系统碳水耦合研究现状及趋势. 生态学报, 2020, 40(15): 5441-5449.

# 基于 CiteSpace 的陆地生态系统碳水耦合研究现状及趋势

马龙龙<sup>1,2</sup>, 杜灵通<sup>1,2,\*</sup>, 丹杨<sup>1,2</sup>, 王乐<sup>1,2</sup>, 乔成龙<sup>1,2</sup>, 孟晨<sup>1,2</sup>, 倪细炉<sup>1,2</sup>

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

**摘要:**在全球气候变化的背景下, 陆地生态系统碳水耦合研究已引起世界各国学者和研究机构的广泛关注。基于 Web of Science 核心数据库, 运用文献数据可视化应用软件 CiteSpace 对国际上有关陆地生态系统碳水耦合的研究现状进行分析, 旨在探究研究热点及趋势, 归纳研究主题演进, 了解当前国际研究前沿。研究发现: (1) 1999—2018 年, 关于陆地生态系统碳水耦合的研究论文数量呈现快速增加的趋势, 后 10 年的增加速度快于前 10 年; 形成了以 Black TA、Yu GR、Chen JQ 为主的核心作者群; 中国科学院、中国科学院大学、美国林业局、加州大学伯克利分校、俄勒冈州立大学等发文数量居前的研究机构。(2) 从共被引期刊和研究领域可以看出, 陆地生态系统碳水耦合研究涉及环境科学与生态学、生态学、环境科学、气象与大气科学、林学、农学及水资源等领域, 体现出综合性和交叉性特点。(3) 在全球气候变化背景下, 目前陆地生态系统碳水耦合关系的研究主要以通量观测站为依托, 结合模型模拟、稳定同位素技术、涡度相关技术等研究手段, 将单个通量站点联合扩展到多点联网格局, 并结合 GIS、遥感和模型等方法在面上进行观测与模拟, 从而构建更大尺度的碳水资源评价模型。拓展和推移研究的空间尺度, 预测时间尺度上的变异规律是近年来新兴的研究热点。

**关键词:** 碳水耦合; 陆地生态系统; CiteSpace 软件; 气候变化; 涡度相关

近年来以大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加为主要特征的“碳问题”和以淡水资源短缺为主要特征的“水问题”已引发了全世界陆地生态系统碳水循环研究的热潮<sup>[1-2]</sup>。碳水循环作为陆地生态系统物质能量循环的核心, 两者并不彼此孤立, 而是密切联系、相互耦合的生态学过程; 当前, 两者间耦合关系的研究已成为碳水循环和生态系统碳水管理的重点之一<sup>[3]</sup>。碳循环主要包括植被光合固碳、植被呼吸消耗、凋落物分解和土壤碳循环等过程, 水循环主要包括降水、蒸散发、产流和土壤水分变化等过程<sup>[2]</sup>; 陆地生态系统碳水循环通过这些内在机制耦合, 光合作用过程主要受辐射、土壤水分含量、气孔导度、叶片生物量和化学作用控制, 这些因素也是调节水分蒸散的关键因素<sup>[1-4]</sup>; 蒸散和降水的季节模式共同影响陆地生态系统的生产力, 陆地生态系统呼吸主要由土壤温度和湿度控制。可见, 植被、土壤、大气等多种生物与环境因子共同控制着陆地生态系统的碳水耦合过程<sup>[2,5-6]</sup>, 但二者的耦合机制尚需深入研究<sup>[7-8]</sup>, 其结果将成为碳水资源综合管理的新切入点。

已有文献从基于生理生态学的叶片尺度<sup>[9-10]</sup>、利用通量观测的冠层尺度<sup>[11-12]</sup>和基于遥感数据与水文观测的区域尺度<sup>[2-3,8-9]</sup>, 对陆地生态系统碳水耦合机理及其变化规律开展研究<sup>[13-14]</sup>。虽然我国有关陆地生态系统碳水耦合的研究起步较晚<sup>[11]</sup>, 但随着中国陆地生态系统通量观测与研究网络 (China FLUX) 的建设, 相关研究

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41967027, 41661003); 宁夏优秀人才支持计划 (RQ0012); 宁夏高等学校一流学科建设 (生态学) 项目 (NXYLXK2017B06)

**收稿日期:** 2019-07-09; **网络出版日期:** 2020-05-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dult80@qq.com

得到迅猛发展<sup>[15]</sup>,并推动全球变化生态学研究进入一个全新的时代<sup>[16]</sup>,与碳水耦合循环的4个关键科学问题也成为未来 China FLUX 关注的重点<sup>[17]</sup>。近年来,不同学科的研究人员在国际主流期刊呈“井喷式”发表陆地生态系统碳水耦合方面的研究成果,但不同文献关注的科学问题和研究侧重点存在差异。为此,本文基于 Web of Science 数据库,运用文献数据可视化应用软件 CiteSpace<sup>[18-19]</sup>,从文献计量角度对陆地生态系统碳水耦合的作者、机构、期刊、研究领域及关键词等进行分析,理清当前国际研究的知识结构,阐述陆地生态系统碳水耦合的演化发展路径与发展态势,揭示研究前沿与热点,指导相关科研人员开展研究。

## 1 数据来源与方法

Web of Science 数据库是由美国科技信息所(Institute for Scientific Information, ISI)推出的引文索引数据库,是目前提供引文回溯数据最深的数据库,所收录的文献覆盖了全世界最重要和最有影响力的研究成果,已成为国际公认进行科学统计与科学评价的主要检索工具<sup>[18]</sup>。本研究以 Web of Science TM 核心数据库的自然科学引文索引(Science Citation Index Expanded, SCI-E)为数据源,采用高级检索方式,以“TS = ( carbon-water coupling OR water-carbon coupling OR water carbon relationship OR water carbon process OR carbon and water cycles OR CO<sub>2</sub> and water OR carbon water interaction OR carbon water flux OR photosynthesis-evapotranspiration OR water use efficiency OR stomatal conductivity OR coupling relationship of carbon and water cycle OR carbon and water exchange OR photosynthesis behavior-transpiration coupling relationship) AND TS = ( Ecosystem)”为检索主题,检索时间跨度为 1999—2018 年,语言为英语,(数据检索日期为 2019 年 5 月),文献类型为“Article”,共检索文献 17079 篇,通过对检索到的文献进行筛选精练,最终得到涉及陆地生态系统碳水耦合研究的文献 4472 篇。

CiteSpace 知识图谱是由美国德雷塞尔大学教授陈超美开发,用来分析、挖掘及进行科研文献可视化的应用软件。该软件基于共被引分析理论、寻径网络算法等方法,通过数据挖掘、信息分析、图谱绘制,展现特定学科领域的知识结构,直观地表现知识群的演化过程<sup>[19-20]</sup>。自可视化文献分析软件 CiteSpace 及其图谱绘制方法引入国内后,借助知识图谱分析科学研究热点在诸多学科中得到了广泛应用。文中所使用的数据采用 CiteSpace 的 Web of Science 数据分析板块进行处理,对陆地生态系统碳水耦合相关研究的作者、机构、期刊及关键词研究热点前沿等进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 文献产出时间序列分析

时间是投射客观存在的一个普遍维度,一些理论在时间发展序列中会表现出规律性<sup>[16]</sup>。在 1999—2018 年的 20 年间,Web of Science 的核心集数据库中关于陆地生态系统碳水耦合的研究共发文 4472 篇,发文量呈显著增加趋势,年均增加 219.95 篇(图 1);其中 1999—2008 年,10 年间发文量仅占总发文量的 26.25%,年均增加 117.4 篇,而 2009—2018 年的占比高达 73.75%,年均增加 329.8 篇,年均增加篇数是前 10 年的 2.78 倍,发文数量明显加快。近年来国际上碳水耦合研究发文量呈现快速增加趋势,这与全球通量网络和遥感技术的快速发展为陆地生态系统碳水耦合相关研究提供了丰富的数据基础有关<sup>[9]</sup>。

### 2.2 主要发文机构与国家

基于 CiteSpace 软件中 Institution 分析功能,对 4472 篇文献的发文机构进行分析,得到主要发文机构排名(表 1)和机构合作图谱(图 2)。从发文数量可以看出,陆地生态系统碳水耦合研究集中于高校和科研院所,其中中国科学院、中国科学院大学、美国林业局、加州大学伯克利分校和俄勒冈州立大学发文数位居前五,占总发文量的 19.83%;发文量在 40 篇以上的机构共 20 所,占发文总数的 50%;这说明陆地生态系统碳水耦合的研究机构相对集中,但不同研究机构间科研能力存在较大差异。中国科学院和中国科学院大学作为我国具有较高科研水平的研究院和高校,承担着大量的相关研究,对我国碳水耦合的发展做出了突出的贡献。在发

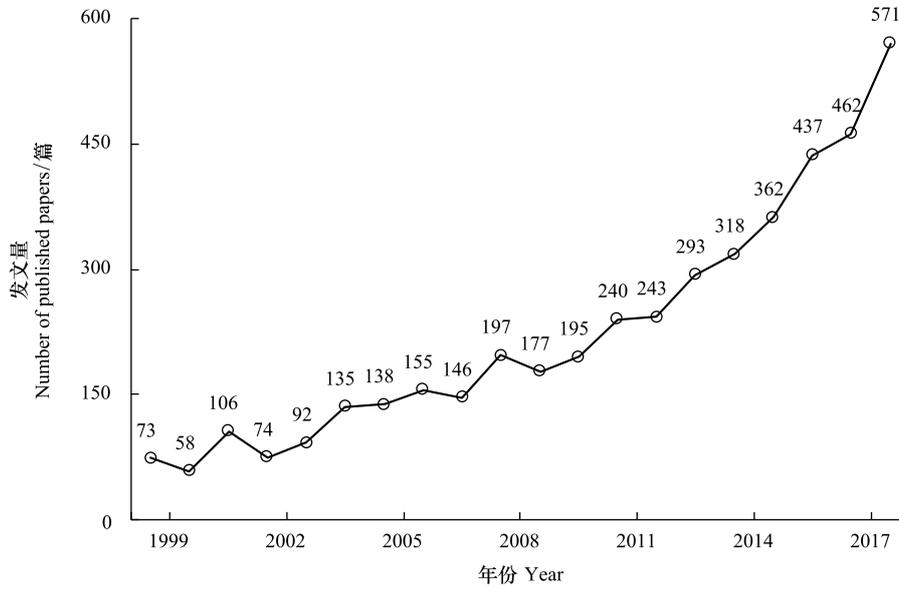


图 1 每年发表总论文数 (1999—2018)

Fig.1 Annual number of publication from 1999 to 2018

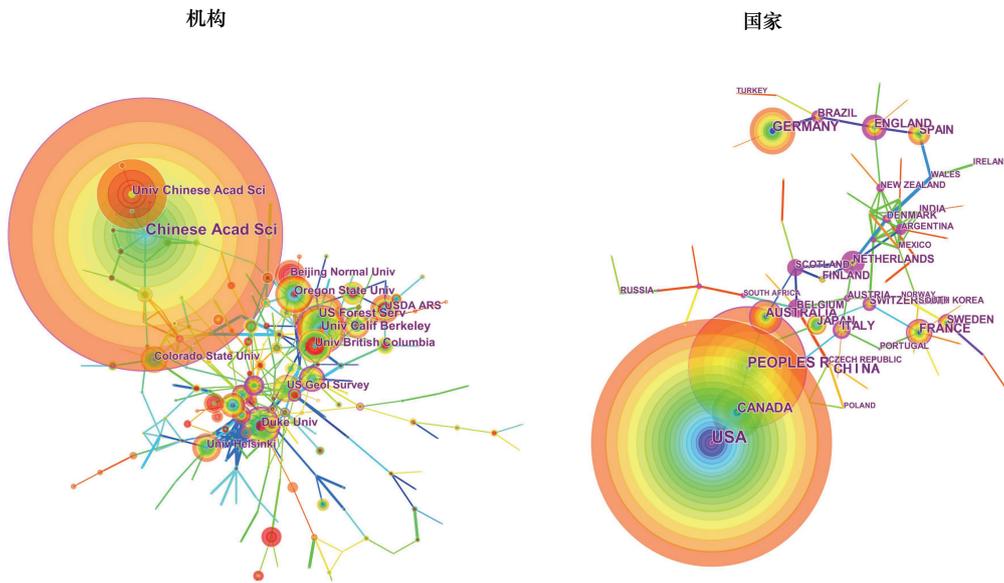


图 2 陆地生态系统碳水耦合研究的机构和国家知识图谱

Fig.2 Visualization knowledge map of institutions and countries of carbon-water coupling of terrestrial ecosystem

文量前十的机构中,有 6 所机构属于美国;结合国家知识图谱(图 2)和各国发文频次可以看出,发文章最多的国家是美国,占比达到 26.35%,可见美国在陆地生态系统碳水耦合研究领域依然引领世界;其次是中国,占比为 13.02%,中国在陆地生态系统碳水耦合领域的研究也具有举足轻重的地位。

### 2.3 主要发文作者

利用 CiteSpace 中 Author 分析功能对发文作者进行分析,得到发文作者图谱(图 3)和发文章排名(表 2)。结果显示,Black TA 为发文章最多的作者,已发表 52 篇相关论文;Yu GR 和 Chen JQ 紧随其后,各发表 41 篇;Black TA、Yu GR、Chen JQ、Sun G 四位作者发文章排名前四,均在 20 篇以上。共有 31 位作者发文章在 10 篇

以上,占总发文量的 12.18%,成为陆地生态系统碳水耦合研究的核心作者群,为陆地生态系统碳水耦合的相关研究做出了较大的贡献。进一步研读文献发现,基于气孔行为的光合-蒸散碳水耦合模型<sup>[21-23]</sup>、碳水耦合的定量评价——水分利用效率<sup>[14]</sup>、涡度相关技术<sup>[5,9]</sup>、遥感技术的尺度外推<sup>[2]</sup>、大尺度的碳水资源评价模型等领域是核心作者群的研究热点。从作者发文图谱(图 3)可以看出,不同作者间主要以核心作者为节点开展合作研究,但核心作者彼此之间合作较少,这主要是因为不同团队之间受地域学缘等因素影响,联系强度较弱,未来应加强不同国家、不同核心作者间的深入合作。

表 1 陆地生态系统碳水耦合研究发文量前 10 的机构

Table 1 Top ten institutions of the number of published papers

排序 Rank	机构 Institution	国家 Country	发文量 Number of published papers
1	中国科学院	中国	519
2	中国科学院大学	中国	134
3	美国林业局	美国	108
4	加州大学伯克利分校	美国	101
5	俄勒冈州立大学	美国	85
6	杜克大学	美国	81
7	不列颠哥伦比亚大学	英国	76
8	美国地质调查局	美国	66
9	北京师范大学	中国	66
10	美国农业部农业研究组织	美国	64

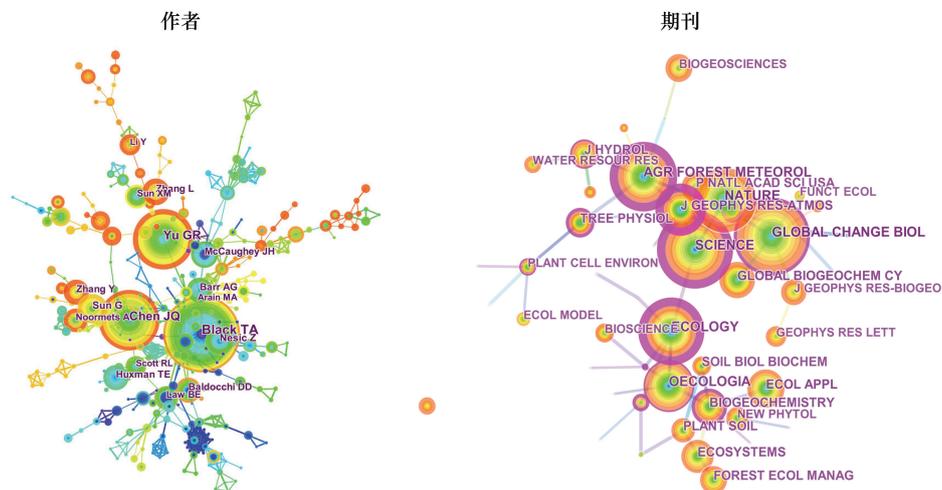


图 3 陆地生态系统碳水耦合研究的作者和期刊共被引期刊知识图谱

Fig. 3 Visualization knowledge map of authors and co-citation journals of carbon-water coupling of terrestrial ecosystem

#### 2.4 期刊共被引和研究领域

对碳水耦合研究的文献进行期刊共被引分析,可以在一定程度上反映出碳水耦合研究的重点领域。其中共被引频次最高的期刊是《Global Change Biology》,共被引 2559 次;其次为《Nature》、《Science》、《Agricultural and Forest Meteorology》及《Ecology》等(表 3)。共被引频次前 10 的期刊均在其相关的研究领域具有很高的权威性,在一定程度上可以代表陆地生态系统碳水耦合研究领域的重点(图 3)。陆地生态系统碳水耦合研究涉及的领域主要为环境科学与生态学、生态学、环境科学、大气与气象科学、林学、农学及水资源等,其中环境科学与生态学占据首位,其次为生态学和环

态系统碳水耦合研究的广泛性、综合性和交叉性等特点。

表 2 排名前 20 位发文作者

Table 2 Top twenty authors for published number

排序 Rank	发文篇数 Number of published papers	作者 Author	排序 Rank	发文篇数 Number of published papers	作者 Author
1	52	Black TA	11	17	Huxman TE
2	41	Yu GR	12	16	Noormets A
3	41	Chen JQ	13	16	Law BE
4	20	Sun G	14	16	Sun XM
5	19	Nesic Z	15	14	Arain MA
6	18	McCaughey JH	16	14	Scott RL
7	18	Zhang L	17	14	Li Y
8	17	Baldocchi DD	18	13	Yu Q
9	17	Barr AG	19	13	Beringer J
10	17	Zhang Y	20	13	Morgenstern K

表 3 陆地生态系统碳水耦合研究前 10 位共被引期刊

Table 3 Top ten of co-citation journals published articles of carbon-water coupling research

排序 Rank	共被引频次 Co-citation frequency	期刊 Journal
1	2559	Global Change Biology 全球变化生物学
2	2431	Nature 自然
3	2316	Science 科学
4	2049	Agricultural and Forest Meteorology 农业和森林气象学
5	1940	Ecology 生态学
6	1851	Oecologia 生态学
7	1635	Ecological Applications 应用生态学
8	1536	Global Biogeochemical Cycles 全球生物地球化学循环
9	1500	Journal of Geophysical Research Atmospheres 地球大气物理研究杂志
10	1366	Ecosystems 生态系统

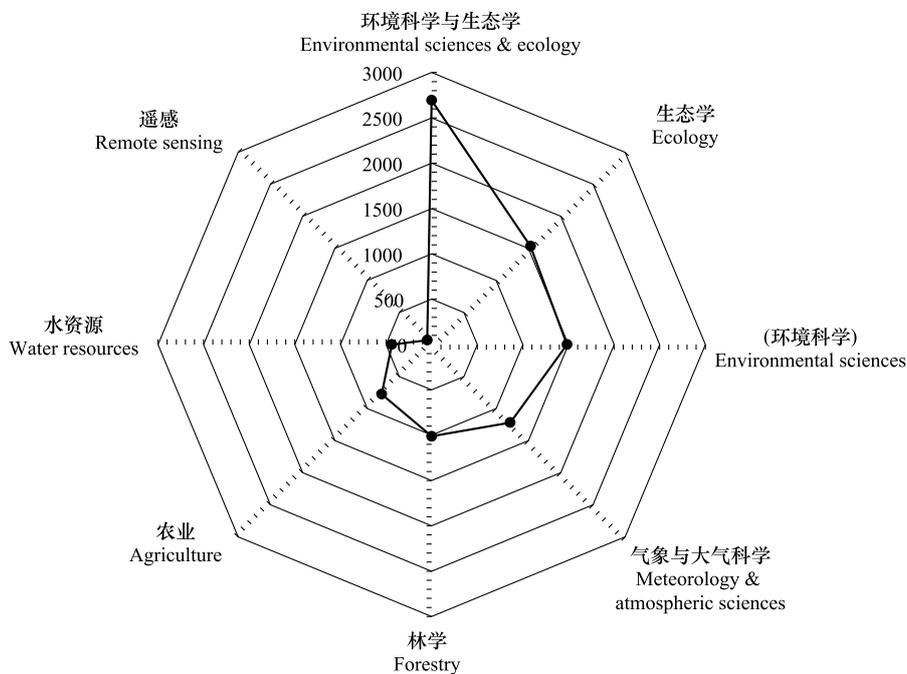


图 4 陆地生态系统碳水耦合研究领域分布

Fig.4 Involved research fields of carbon-water coupling of terrestrial ecosystem

## 2.5 关键词分析

### 2.5.1 关键词发展路径分析

关键词知识图谱由被分析文献的所有关键词提取绘制得出,可以直观的呈现出该研究领域的中心词汇及研究路径演变<sup>[24-25]</sup>。陆地生态系统碳水耦合研究的关键词知识图谱的最大节点为“气候变化”,其次为“生态系统”和“涡度相关”(图 5),这 3 个关键词分别出现了 766 次、600 次和 571 次(表 4);并以“气候变化”为节点延伸出 2 个主要研究路径,揭示了陆地生态系统碳水耦合研究的主题演变趋势。在全球“气候变化”的大背景下,碳水耦合的研究主要有两条路径,一条是以陆地生态系统碳水耦合关系的定量评价为主线,即围绕生态系统“水分利用效率”这一核心,开展植物水分利用消耗与生态系统生产力之间的相互作用关系研究。另一条主要以“涡度相关”和“生态系统”为主,基于通量站点涡度相关系统的观测数据开展陆地生态系统碳水耦合规律研究,构建基于生理生态或生态水文过程的碳水耦合模型<sup>[2]</sup>,根据时间序列动态过程,进行尺度推演,模拟和预测碳水耦合机制,将小尺度的碳水关系的变异规律推演到较大的时空尺度上,探究整个陆地生态系统碳水通量双向反馈作用机制,并预测其未来变化趋势<sup>[11]</sup>。

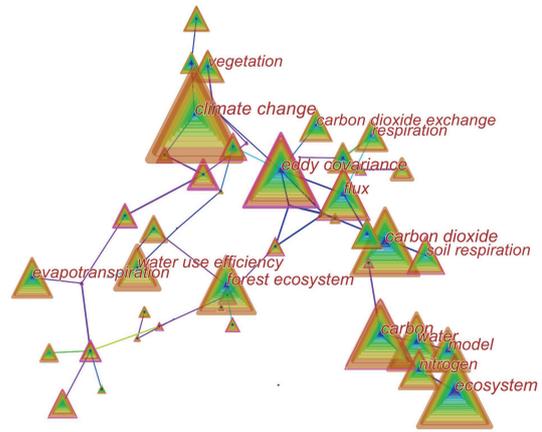


图 5 陆地生态系统碳水耦合关键词共现可视化知识图谱  
Fig.5 Key words co-occurrence visualization knowledge map of carbon-water coupling of terrestrial ecosystem

表 4 陆地生态系统碳水耦合研究高频关键词

Table 4 High frequency key words of carbon-water coupling of terrestrial ecosystem

排序 Rank	频次 Frequency	关键词 Keyword	排序 Rank	频次 Frequency	关键词 Keyword
1	766	Climate change 气候变化	11	372	Evapotranspiration 蒸散
2	600	Ecosystem 生态系统	12	361	Nitrogen 氮
3	571	Eddy covariance 涡度相关	13	326	Soil respiration 土壤呼吸
4	553	Carbon 碳	14	321	Carbon dioxide exchange 二氧化碳交换
5	552	Carbon dioxide 二氧化碳	15	318	Temperature 温度
6	490	Water 水	16	312	Respiration 呼吸
7	485	Forest ecosystem 森林生态系统	17	305	Dynamics 动力学
8	415	Water use efficiency 水分利用效率	17	305	Vegetation 植物
9	405	Flux 通量	19	289	Photosynthesis 光合作用
10	391	Model 模型	20	288	Water vapor 水汽

### 2.5.2 研究前沿趋势分析

陆地生态系统碳水耦合的研究是一个逐步演变的过程,根据发表论文关键词发展路径和发文时间分析,发现陆地生态系统碳水耦合的研究内容不断延伸,利用 CiteSpace 软件中突变检测分析方法<sup>[26]</sup>,得到陆地生态系统碳水耦合研究关键词的共现网络突现词(表 5),并由此确定陆地生态系统碳水耦合研究热点。

21 世纪之前,关于碳水耦合的模拟研究始于 Farquhar 等<sup>[27]</sup>的光合模型和 Ball 等<sup>[28]</sup>的光合与气孔导度关系模型<sup>[2,29]</sup>,研究叶片尺度上的碳水耦合关系的机理机制;随后又基于“大叶模型”的假设(即把植物冠层想象成一片大的叶子),将研究尺度从叶片拓展冠层<sup>[25]</sup>;此阶段主要集中在研究光合作用—气孔行为—蒸腾作用之间的相互协同关系,构建生理生态模型,模拟叶片和冠层尺度碳水之间的相互关系<sup>[30-32]</sup>。其中,“冠层”作为关键词的突现强度为 14.6335,“气孔导度”突现强度为 3.8650,说明该关键词在陆地生态系统碳水耦



俄勒冈州立大学等发文数量位居前的研究机构。陆地生态系统碳水耦合研究涉及环境科学与生态学、生态学、环境科学、大气与气象科学、林学、农学及水资源等领域,体现出综合性和交叉性的特点。

(2)“气候变化”、“生态系统”和“涡度相关”等关键词中出现频率最高,关键词知识图谱延伸出两条研究路径,一条围绕生态系统“水分利用效率”这一关键词,开展植物水分利用消耗与生态系统生产力之间的相互作用关系研究;另一条主要以“涡度相关”和“生态系统”关键词为主,基于通量站点涡度相关系统的观测数据,开展不同尺度陆地生态系统碳水耦合规律研究。

(3)在全球变化背景下,陆地生态系统碳水耦合关系的研究要以通量观测站为依托,结合模型模拟、稳定同位素技术、涡度相关技术等先进手段,将单个通量站点联合扩展到多点联网格局,并结合 GIS、遥感和模型模拟等方法在面上进行观测和模拟,从而构建更大尺度的碳、水资源评价模型。拓展和推移研究的时空尺度,预测时间尺度上的变异规律是近年来新兴的研究热点。

#### 4 展望

在 1999—2018 年期间,关于陆地生态系统碳水耦合的全球发文量随时间呈快速增加的趋势,这与生态学其他研究方向的论文增长规律一致<sup>[36]</sup>。从研究机构和作者团队的影响力来看,中国在陆地生态系统碳水耦合研究方面具有一定的领先地位,但不同团队和机构之间受地域学缘等因素影响,联系强度较弱,而陆地生态系统碳水耦合研究作为一个多学科交叉的研究领域,应该尽可能的发挥每个学科的优势,应加强国内外高校和科研机构间的科技合作,以便进一步提升中国在这方面研究的综合实力,实现资源共享,优势互补。由于陆地生态系统碳水耦合涉及不同的研究领域,很难具体到某一确定的概念,这对数据检索和文献精炼有一定的影响,且本文主要分析了发文数量、机构、作者、关键词等,对论文其他引用情况等未做分析。因此,将来可考虑利用多种数据源的综合评价指标来开展多维度的研究进展分析,以获得更为丰富的有关陆地生态系统碳水耦合研究的知识发现。同时,还可利用多种分析方法或 TDA (Thomson Data Analyzer)、VOSviewer 等文献分析软件,从不同角度和不同层面对陆地生态系统碳水耦合的研究现状及趋势进行研究,以期更深入准确的把握这一研究领域的热点。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 赵风华, 于贵瑞. 陆地生态系统碳-水耦合机制初探. 地理科学进展, 2008, 27(1): 32-38.
- [ 2 ] 刘宁, 孙鹏森, 刘世荣. 陆地水-碳耦合模拟研究进展. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3187-3196.
- [ 3 ] 刘宁. 川西亚高山森林生态系统水碳过程耦合与模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [ 4 ] 严登华, 秦天玲, 张萍, 邢子强. 基于低碳发展模式的水资源合理配置框架研究. 水利学报, 2010, 41(8): 970-976.
- [ 5 ] Chen J Q, Paw U K T, Ustin S L, Suchanek T H, Bond B J, Brosfokske K D, Falk M. Net ecosystem exchanges of carbon, water, and energy in young and old-growth Douglas-fir forests. *Ecosystems*, 2004, 7(5): 534-544.
- [ 6 ] 赵风华, 王秋风, 王建林, 王吉顺, 欧阳竹, 于贵瑞. 小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理. 生态学报, 2011, 31(24): 7526-7532.
- [ 7 ] 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [ 8 ] 于贵瑞, 王秋风, 方华军. 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环的基本科学问题、理论框架与研究方法. 第四纪研究, 2014, 34(4): 683-698.
- [ 9 ] 于贵瑞, 高扬, 王秋风, 刘世荣, 申卫军. 陆地生态系统碳-氮-水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13.
- [ 10 ] Zenone T, Fischer M, Arriga N, Broeckx L S, Verlinden M S, Vanbeveren S, Zona D, Ceulemans R. Biophysical drivers of the carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a short-rotation poplar coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210: 22-35.
- [ 11 ] Xiao J F, Sun G, Chen J Q, Chen H, Chen S P, Dong G, Gao S H, Guo H Q, Guo J X, Han S J, Kato T, Li Y L, Lin G H, Lu W Z, Ma M G, McNulty S, Shao C L, Wang X F, Xie X, Zhang X D, Zhang Z Q, Zhao B, Zhou G S, Zhou J. Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182-183: 76-90.
- [ 12 ] 郭维华, 李思恩. 西北旱区葡萄园水碳通量耦合的初步研究. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 61-63.
- [ 13 ] 宋春林, 孙向阳, 王根绪. 森林生态系统碳水关系及其影响因素研究进展. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2891-2902.
- [ 14 ] Luo X Z, Chen J M, Liu J, Black T A, Croft H, Staebler R, He L M, Arain M A, Chen B, Mo G, Gonsamo A, McCaughey H. Comparison of

- big-leaf, two-big-leaf, and two-leaf upscaling schemes for evapotranspiration estimation using coupled carbon-water modeling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(1): 207-225.
- [15] Yu G R, Ren W, Chen Z, Zhang L M, Wang Q F, Wen X F, He N P, Zhang L, Fang H J, Zhu X J, Gao Y, Sun X M. Construction and progress of Chinese terrestrial ecosystem carbon, nitrogen and water fluxes coordinated observation. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 803-826.
- [16] Yu G R, Chen Z, Zhang L M, Peng C H, Chen J M, Piao S L, Zhang Y J, Niu S L, Wang Q F, Luo Y Q, Philippe C, Dennis B D. Recognizing the scientific mission of flux tower observation networks—lay the solid scientific data foundation for solving ecological issues related to global change. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(2): 115-120.
- [17] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- [18] 施生旭, 童佩珊. 基于 CiteSpace 的城市群生态安全研究发展态势分析. *生态学报*, 2018, 38(22): 8234-8246.
- [19] 陈林, 宋乃平, 王磊, 杨新国, 李学斌, 苏莹, 李月飞. 基于文献计量分析的蒿属植物研究进展. *草业学报*, 2017, 26(12): 223-235.
- [20] 柯丽娜, 阴曙升, 刘万波. 基于 CiteSpace 中国海洋生态经济的文献计量分析. *生态学报*, 2018, 38(15): 5602-5610.
- [21] Yu G R, Zhuang J, Yu Z L. An attempt to establish a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior for maize and soybean plants grown in field. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158(7): 861-874.
- [22] Meyer G, Black T A, Jassal R S, Nescic Z, Grant N J, Spittlehouse D L, Fredeen A L, Christen A, Coops N C, Foord V N, Bowler R. Measurements and simulations using the 3-PG model of the water balance and water use efficiency of a lodgepole pine stand following mountain pine beetle attack. *Forest Ecology and Management*, 2017, 393: 89-104.
- [23] Black T A, Hartog G D, Neumann H H, Blanken P D, Yang P C, Russell C, Nescic Z, Lee X, Chen S G, Staebler R, Novak M D. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 219-229.
- [24] 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. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- [25] 王建勋, 华丽, 邓世超, 孔祥茹, 王惠东. 基于 CiteSpace 国内干旱遥感监测的知识图谱分析. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 154-161.
- [26] 孙威, 毛凌潇. 基于 CiteSpace 方法的京津冀协同发展研究演化. *地理学报*, 2018, 73(12): 2378-2391.
- [27] Farquhar G D, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [28] Ball J T. An analysis of stomatal conductance. Stanford: Stanford University Press, 1988.
- [29] 张宝忠, 刘钰, 许迪, 蔡甲冰, 魏征. 夏玉米叶片和冠层尺度的水碳耦合模拟. *科学通报*, 2013, 58(12): 1121-1130.
- [30] Ono K, Maruyama A, Kuwagata T, Mano M, Takimoto T, Hayashi K, Hasegawa T, Miyata A. Canopy-scale relationships between stomatal conductance and photosynthesis in irrigated rice. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2209-2220.
- [31] Zhang Y L, Song C H, Sun G, Band L E, McNulty S, Noormets A, Zhang Q F, Zhang Z Q. Development of a coupled carbon and water model for estimating global gross primary productivity and evapotranspiration based on eddy flux and remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 223: 116-131.
- [32] Sun G, Sun J X, Zhou G S. Water and carbon dynamics in selected ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1789-1790.
- [33] Hong J, Kim J. Impact of the Asian monsoon climate on ecosystem carbon and water exchanges: a wavelet analysis and its ecosystem modeling implications. *Global Change Biology*, 2011, 17(5): 1900-1916.
- [34] Scott R L, Huxman T E, Williams D G, Goodrich D C. Ecohydrological impacts of woody-plant encroachment: seasonal patterns of water and carbon dioxide exchange within a semiarid riparian environment. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 311-324.
- [35] Govind A, Chen J M, McDonnell J, Kumari J, Sonntag O. Effects of lateral hydrological processes on photosynthesis and evapotranspiration in a boreal ecosystem. *Ecohydrology*, 2011, 4(3): 394-410.
- [36] Liao J Q, Huang Y. Global trend in aquatic ecosystem research from 1992 to 2011. *Scientometrics*, 2014, 98(2): 1203-1219.