

基于CiteSpace近二十年植物叶脉密度研究现在与趋势分析

周 维

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年12月25日; 录用日期: 2024年3月15日; 发布日期: 2024年3月28日

摘 要

叶脉在植物叶片中具有物质传输的功能, 用于供应水分、传输养分和糖以及为叶片提供生物机械支撑, 其中叶脉结构通过影响叶片的水分供应状况, 进而直接影响植物叶片的光合作用。本研究采用文献计量学方法, 对植物叶脉密度相关文献的年发表数量进行了定量分析。研究结果显示了植物叶脉密度研究的基本文献特征、主要智力基础和主要研究力量。同时, 揭示了该领域的研究热点和趋势。本研究从文献计量学的角度对植物叶脉密度进行了客观、全面的分析。为相关领域的学者细化研究方向、解决具体科学问题、寻求或建立感兴趣领域的相关合作提供参考。

关键词

叶脉密度, CiteSpace, 计量方法, 研究现状, 研究热点

Research and Trend Analysis of Plant Leaf Vein Density in the Past Two Decades based on CiteSpace

Wei Zhou

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Dec. 25th, 2023; accepted: Mar. 15th, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

Leaf veins play a crucial role in plant foliage by facilitating material transport, including water supply, nutrient and sugar transport, and providing biomechanical support. The structure of leaf

veins directly affects the water supply of leaves, thereby impacting plant photosynthesis. In this study, a bibliometric approach was employed to quantitatively analyze the publication trends of plant leaf vein density research. The study revealed the fundamental characteristics, major intellectual foundations, and key research contributors in the field of plant leaf vein density. Additionally, it identified research hotspots and trends. This research provides an objective and comprehensive analysis of plant leaf vein density from a bibliometric perspective. It serves as a reference for scholars in related fields to refine their research directions, address specific scientific questions, and seek collaborative opportunities in their areas of interest.

Keywords

Leaf Vein Density, CiteSpace, Bibliometric Approach, Research Status, Research Hotspots

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

叶脉结构变化很大,从单条形维管束(如松树),分枝形结构(如银杏),开放形的网状结构(如许多蕨类植物)到单子叶植物的大部分平行结构,再到许多被子植物[1]复杂的网状结构。叶脉结构在空间尺度上有多个变化,例如在长度上有多个级别的分支,其范围从 10^{-5} ~ 10^0 米[2][3]。我们将空间尺度定义为叶脉结构在一定范围内的特征,例如叶脉所环面积或叶脉半径。

叶脉结构可能与多种功能有关[4],它的选择可以最大限度地提高资源运输的效率、抗破坏能力、机械强度,或者减少总构建成本。从物质运输角度分析,叶脉与光合作用和蒸腾均有关,因为在大多数物种,由叶脉介导的物质运输占叶片总电导的很大一部分[5],尽管在其他组织的变化也很重要,比如维管束鞘的形成[6]。为了抵御损害,叶脉网状结构中环路的存在[7]可以防止在低水势下降低电导引起的栓塞[8]。此外,通过叶脉网络结构运输的防御性次生化合物可以促进对食草动物的进一步抗性[9],因为具有多条流动路径的受损叶片仍然可以将次生化合物或其他信号分子传递到叶片的其他部分。对于机械强度,叶脉结构可以提供一个支撑骨架,使其树叶在风中保持直立,以便支持光合作用[10]。就构建成本而言,与其他植物组织相比,一般包含叶脉的木质化组织构建成本较高[11][12],而且还可能取代分配给光合作用功能所需的叶片体积。因此,深入了解的叶脉结构可以反映这些不同功能之间的关系。

这些功能之间的相互联系,都可能有助于叶脉结构在叶子内的空间尺度范围内发挥功能[13][14]。因此,不同空间尺度的结构特征可能会对功能做出不同的贡献。例如,细脉对电导和光合作用的贡献更大,因为它们的距离很近,而且对水力阻力的影响不成比例[15]。与之相反,因为其不成比例的质量分配[16],主脉对成本[11]和机械强度[17]的贡献更大。从进化的角度来看,叶脉结构的某些方面可能比其他方面更不稳定。较大的叶脉可能在长时间内系统发育保守[18];较小的叶脉被认为进化更快,并显示出发育可塑性[19]。

自2008年以来,人们发现了许多关于植物叶脉密度的文献,包括一些影响较大的综述文章,它们在特定方向的深入研究中发挥了重要作用[20]。采用文献计量学方法对文献进行分析[21],可以更全面地了解植物叶脉密度的研究现状、热门研究课题和发展趋势。CiteSpace [22]是可视化分析工具,用于分析某一特定研究领域的研究热点、前沿、作者机构与国家之间的合作关系以及主题演变[23],如医学[24]、数

学[25]、生态学[26] [27]。本研究采用文献计量学方法,结合 CiteSpace 对文献进行数据挖掘和可视化分析,分析植物叶脉密度的研究现状和热点。旨在促进植物叶脉密度的更全面研究,为相关领域的学者确定研究方向、细化问题提供参考信息。

2. 材料与方法

2.1. 数据收集

文献数据来自 Web of Science Core Collection [28] (WOSCC), SCI-E 是文献计量学研究中最常用的数据库。它被认为是最负盛名的学术期刊系统,其发表的论文通过严格的同行评审[29]。数据于 2023 年 9 月 9 日检索。主题被设置为“TS = (“vein density” OR “leaf vein density” OR “leaf density” OR “venation density”)”,并且文档类型被设置为“All”。所选语言为英语,文献类型包括论文和综述论文,默认时间段为数据库中涉及的所有年份(1985 年~2023 年)。筛选文章的基本信息以纯文本文件格式保存。然后,通过检查标题和摘要,排除与叶脉密度无关的数据。最后,获得了用于视觉分析的有价值的信息。需要注意的是,如果搜索词设置为“TS= (“vein density OR leaf vein density OR leaf density OR venation density”)”,会出现大量与叶脉密度无关的文章,严重影响后续分析的准确性。最后,将检索词设置为“TS= (“vein density” OR “leaf vein density” OR “leaf density” OR “venation density”)”得到的文章均与叶脉密度密切相关。

2.2. 分析方法

通过 WOSCC 获得的数据包括标题、作者、年份、来源出版物、关键词、摘要和参考文献。CiteSpace.6.1.R6 (64.bit)是由美籍华人学者陈超美教授开发的基于 Java 语言的可视化分析软件。在这项研究中,CiteSpace.6.1.R6 (64位)用于根据 WOSCC 数据和主要期刊、主题分布和资助单位的可视化分析绘制作者、机构、国家和团队合作的网络图谱[25]。此外,利用 CiteSpace 对关键词进行聚类分析,找出本领域的研究热点和研究前言。CiteSpace 参数:时间片(1979~2021),本研究使用每个切片年。我们根据所执行的分析类型选择了不同的节点类型。CiteSpace 的选择标准为:g-index = 25, Top N = 50, Top N% = 10%/100。阈值参数包括引用阈值(c)、引用阈值(cc)和余弦系数阈值(CCV),其分别被设置为 2/2/20、4/3/20 和 4/3/20。剪切方式选择关键路径法(Pathfinder)、精简切片网络(Pruning Sliced Networks)及精简合并网络(Pruning the Merged Network)以简化网络图谱[30],降低网络密度,增强网络可读性;其余设置为默认。节点大小代表出现频次,连线粗细代表共现强度,连线颜色由绿色渐变至黄色,表示文献发表时间由远及近(2008 年~2023 年),以实现作者及关键词等的可视化分析,并绘制相应的知识图谱。使用 Tableau 2023.2.1 软件按国家或地区分析数据的全球分布[31]。利用 Microsoft Excel 2010 绘制饼图和折线图,分析发文类型和发文量。

2.3. 研究说明

中心性是指在整个关系网络中充当中介的能力。在网络结构中,中心性大于 0.1 的节点表示其位置更重要[32]。频率是指检索到的目标词出现的次数。频率高、中心性强的关键词通常是该领域的研究热点。聚合网络是指利用 CiteSpace 软件对相似的关键词进行分类后绘制的聚类图[33]。通过对不同聚类的分析,可以发现研究热点。轮廓值是聚类的反映,是聚类均匀性或一致性的指标。聚类视图的模块值趋近于 1,当轮廓值为> 0.3 时,表明所划分的结构是显著的、合理的。关键词突现(Keyword burst)是指某一年份发表的文献中出现的术语的突然增加。CiteSpace 软件具有关键字突发检测功能。从文献中检测出高频变化率高的关键词,可以识别出某一领域的研究前沿[34]。

3. 结果与讨论

3.1. 发文量分析

截至 2023 年，共检索到 592 篇与植物叶脉密度相关的论文。论文 563 篇，综述论文 17 篇，分别占 WOSCC 出版物总数的 95%、3%。另有 5 篇在线发表，4 篇编辑资料汇编，1 篇书籍章节，1 篇修订，1 篇会议录论文。因此，接下来的分析使用了 580 篇文章和评论，占全部论文的 98% (图 1)。

发文量变化趋势

每年发表论文数的变化可以反映出某一特定研究领域[34]的发展现状和趋势。其中，2008-2013 年发表论文 134 篇，2014~2018 年发表论文 234 篇，2019~2023 年发表论文 287 篇。年平均出版量分别约为 22、47、57 册。因此，我们将整个研究阶段按照年度出版数量(图 1)划分为初始发展、快速发展和深度发展三个阶段。在 2013 年之前，本研究关注度有限，处于初始发展阶段。从 2014 年到 2018 年，随着相关文献的不断发表和理论基础的形成，该领域进入了快速发展阶段。2019 年以后，植物叶脉密度受到越来越多的关注，在 2020 年达到顶峰，共发表 58 篇，该研究进入了深化发展阶段。随着相关研究的发展，植物叶脉密度的研究有望更加深入和完善。

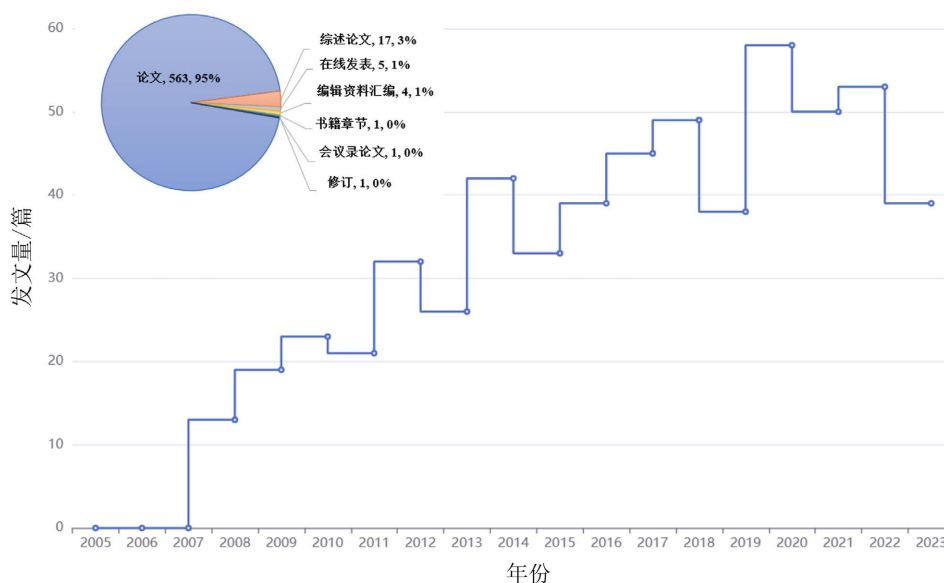


Figure 1. The annual variation in the types and publication volumes of literature related to plant leaf vein density from 2008 to 2023

图 1. 2008~2023 年植物叶脉密度相关文献的类型和发文量年际变化

3.2. 学科分析

我们利用 CiteSpace 的学科可视化功能，分析了主题学科的分布，掌握了主要主题学科与植物叶脉密度涉及的主题之间的关系。节点是某一学科所占比例的指标，可以帮助学者直观地看到学科的分布情况。将中心性为 > 0.1 的节点视为网络中的关键节点，关键节点的学科类别对研究具有重要贡献。在这里，我们可以发现“Plant Sciences”是出现频率最高的学科(280)，说明该学科受到的关注最多，其次是“Ecology”(96)、“Environmental Sciences”(54)、“Forestry”(46)和“Agronomy”(28) (图 2)。在出现频率最高的 10 个学科类别中，“Environmental Sciences”，“Biology”的中心度较高，分别为 0.43 和 0.42，这一结果表明，这两个学科在连接不同学科方面发挥了重要作用。其次是“Agronomy”和“Geosciences Mul-

tidisciplinary”，中心度分别为 0.39 和 0.36 (图 3)。综上所述，“Plant science”和“Ecology”获得最多关注。“Environmental Sciences”和“Biology”是该领域最具影响力的学科。

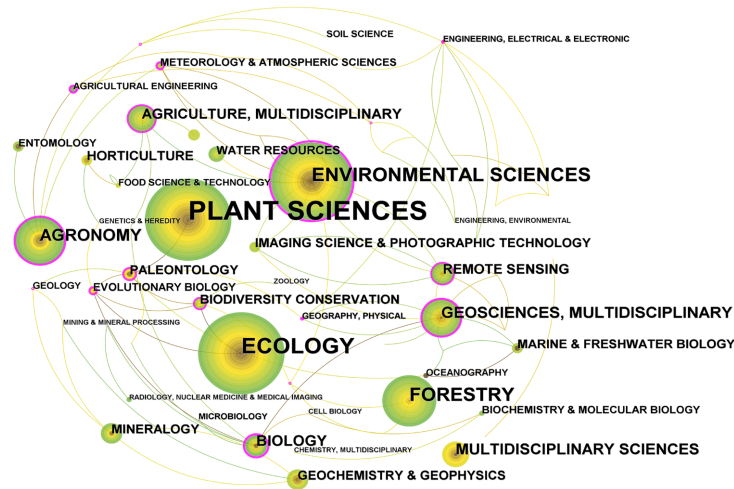


Figure 2. Co-occurrence network map of disciplinary categories in research on plant leaf vein density from 2008 to 2023

图 2. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域学科类别共现图谱

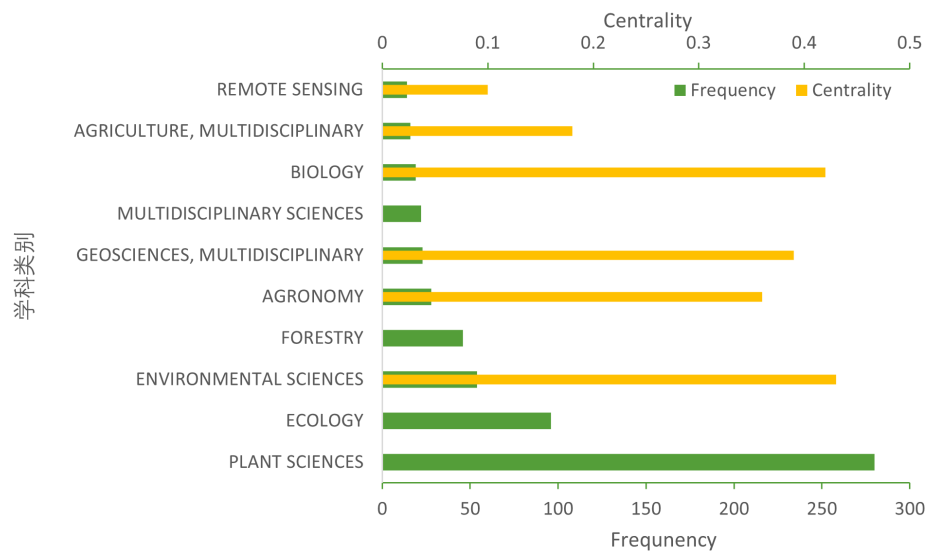


Figure 3. Comparison of publication counts and centrality of the top 10 disciplinary categories in research on plant leaf vein density from 2008 to 2023

图 3. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域前 10 名学科类别发文数量与中心性比较

3.3. 期刊分析

通过对相关文献分布的统计确定出的优秀期刊，可以帮助学者们快速学习到重要的期刊[35][36]，并发表显示学术成就的文章[33]。发表数量最多的前 10 种期刊见表 1。

《New Phytologist》《Plant Cell and Environment》《Plant Physiology》《Annals of Botany》《Journal of Experimental Botany》《Nature》等是有影响的期刊。平均发表论文 296 余篇，均被引用 8600 余次(表 1)。其中，《New Phytologist》以 397 篇发文量、10,993 篇被引频次排名第一。第一个被引用的年份可以

追溯到 2008 年，一直延续到今天。本期刊是植物叶脉密度研究的重要传统期刊。自 2008 年以来，《Plant Cell and Environment》《Plant Physiology》《Annals of Botany》等期刊已成为出版规模较大的新生力量。其中值得注意的是，《Ecology》和《American Journal of Botany》分别发表了 267 篇和 264 篇论文，其中每篇文章被引频次均达 30 次以上。结果表明，在该阶段取得了显著的效果。

Table 1. Comparison of publication counts and centrality of the top 10 journals in the field of plant research from 2008 to 2023

表 1. 2008~2023 年间植物研究领域前 10 名期刊发文数量与中心性比较

期刊	发文量	被引频次	篇均被引频次	第一个引用年份
New Phytologist	397	10,993	27.69	2008
Plant Cell and Environment	323	9807	30.36	2008
Plant Physiology	320	9725	30.39	2008
Annals of Botany	298	8124	27.26	2008
Journal of Experimental Botany	295	8012	27.16	2008
Nature	279	7883	28.25	2008
Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America	272	7913	29.09	2009
Ecology	267	8252	30.91	2008
American Journal of Botany	264	7986	30.25	2008
Oecologia	249	7301	29.32	2008

3.4. 作者分析

Table 2. The top 10 authors in the field of plant research in the period from 2008 to 2023

表 2. 2008~2023 年间植物研究领域发文量前 10 名作者

作者	发文量	被引频次	篇均被引频次	年份
Adams, William W	11	256	23.27	2014~2023
Brodribb, Timothy J	10	588	58.80	2011~2020
Blonder, Benjamin	9	369	41.00	2011~2023
Demmig-adams, Barbara	9	252	28.00	2014~2018
Stewart, Jared J	8	206	25.75	2014~2018
Zhang, Shi-Bao	7	170	24.29	2014~2020
Cohu, Christopher M	6	206	34.33	2014~2023
Muller, Onno	5	206	41.20	2014~2016
Cao, Kun-Fang	5	129	25.80	2014~2022
Zhang, Jiao-Lin	4	141	35.25	2014~2015

通过对核心作者分布的分析，可以更好地了解核心作者分布，促进学术交流合作和研究发展。在表 2 中，列出了发文量在前 10 位的作者，共发表论文 74 篇，占总论文数的 12.76%。植物叶脉密度研究领域，最具生产力的三位作者是 Adams、William W、Brodribb、Timothy J 和 Blonder、Benjamin，他们

各发表了 11、10 和 9 篇文章。值得注意的是，从每篇文章的平均被引频次和被引时间来看，Brodribb、Timothy J 和 Blonder、Benjamin 在初期和发展阶段都做出了突出的贡献，Muller、Onno 在 2014~2016 年间发表了 5 篇文章，其被引频次高达 206 次，是该领域稳定发展阶段的中坚力量

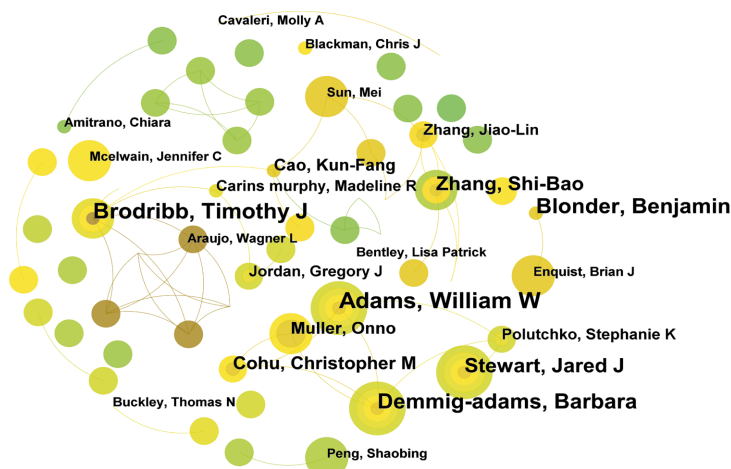


Figure 4. Co-authorship network map of authors in the field of plant leaf vein density research from 2008 to 2023

图 4. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域作者合作共现图谱

通过对作者合作图谱的分析，可以揭示出合作密切的学者群体。如图 4 所示，有两个密切合作的小组。以 Adams、William W 为核心，由 Demmig-adams、Barbara、Stewart Jared J、Muller、Onno 等，主要研究拟南芥等植物叶脉密度相关生理生化特性与温度变化的调控机制[37] [38]。另一个团队以 Brodribb、Timothy John 为核心的团队，包括 Araujo、Wagner L、Zhang Shi-Bao、Cao Kun-Fang 等，主要研究了植物叶脉密度与光合作用和湿度[39] [40]的适应机制。作者合作网络图谱中存在大而少的节点，但小而多节点连接是单一的。这说明植物叶脉密度研究的作者联系不紧密，团队效应不明显。

3.5. 机构分析

分析机构分布有利于说明学者之间的机构间交流与合作[23]。根据发文数排名前三的机构分别是中国科学院、塔斯马尼亚大学和中国科学院大学，这表明这些机构在联系和交流等方面发挥了重要作用(表 3)。值得注意的是，10 所机构中有 8 所是大学。这表明，主要的研究力量分布在大学。此外，塔斯马尼亚大学和澳大利亚国立大学发文量分别是 24 和 9，但被引频次、篇均被引频次和中心性排名均靠前。显然，他们在这一领域的合作与交流中具有较强的影响力(图 5)。

Table 3. Top 10 institutions in terms of publication output in the field of plant research from 2008 to 2023

表 3. 2008~2023 年间植物研究领域发文量前 10 名机构

机构	发文量	被引频次	篇均被引频次	中心性
Chinese AcadSci	57	1146	20.11	0.13
Univ Tasmania	24	2105	87.71	0.21
Univ Chinese AcadSci	21	231	11.00	0.05
HuazhongAgrUniv	13	430	33.08	0
Univ Colorado	10	236	23.60	0

续表

CSIC	9	285	31.67	0.14
Australian NatlUniv	9	390	43.33	0.2
Northwest A&F Univ	8	71	8.88	0.01
Guangxi Univ	8	111	13.88	0.02
UnivCalif Los Angeles	7	530	75.71	0.07
Chinese AcadSci	57	1146	20.11	0.13

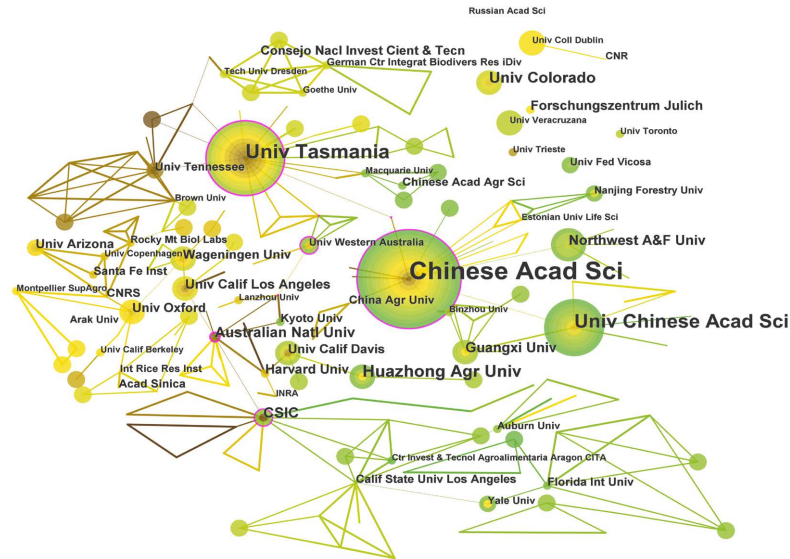


Figure 5. The co-occurrence map of institutional cooperation in the field of plant vein density research from 2008 to 2023

图 5. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域机构合作共现图谱

3.6. 国际合作分析

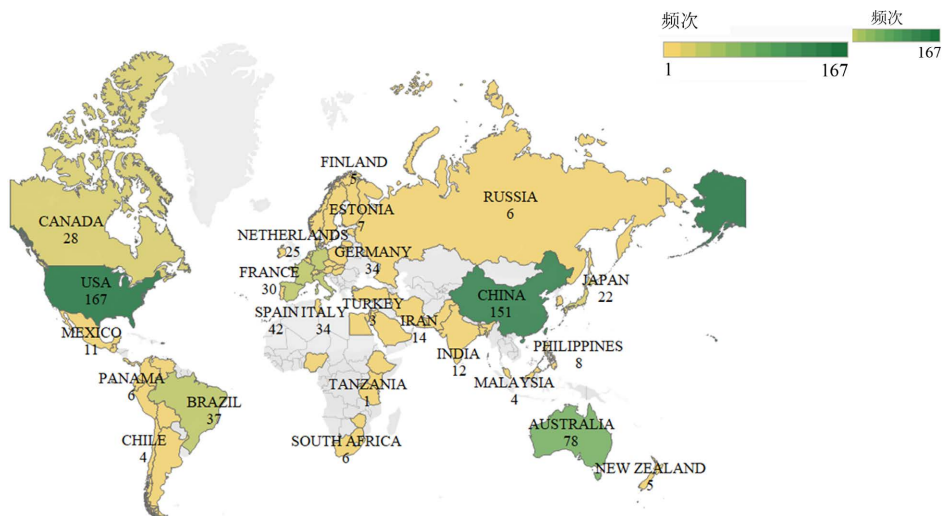


Figure 6. Distribution map of related countries in the field of plant vein density research from 2008 to 2023

图 6. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域相关国家分布图谱

通过分析国家或地区的分布、出版物数量等指标, 可以了解这些国家的地理位置以及该领域的关注程度和影响力[23] [41]。美国以 167 篇论文排名第一, 其次是中国和澳大利亚, 分别为 151 篇和 78 篇(表 4, 图 6)。法国虽然只有 30 篇论文发表, 但每篇论文的平均被引频次较高(41.77)。中国在资助单位中位列第一, 说明中国对植物叶脉密度研究非常重视(表 5)。美国、英格兰和德国中心性大于 0.2, 说明这些国家对国际交流的贡献更大, 在国际合作方面比其他国家更积极(图 6)。

Table 4. Top 10 countries in the field of plant research from 2008 to 2023

表 4. 2008~2023 年间植物研究领域发文量前 10 名国家

国家	频次	引用频次	篇均引用频次	中心性
USA	167	5364	32.12	0.32
CHINA	151	2389	15.82	0.17
AUSTRALIA	78	3434	44.03	0.12
SPAIN	42	1527	36.36	0.07
ENGLAND	41	1232	30.05	0.24
BRAZIL	37	389	10.51	0.03
ITALY	34	960	28.24	0.1
GERMANY	34	1072	31.53	0.25
FRANCE	30	1253	41.77	0.08
CANADA	28	730	26.07	0.06

Table 5. Top 10 funding agencies in the field of plant research from 2008 to 2023

表 5. 2008~2023 年间植物研究领域发文量前 10 名资助机构

资助机构	计数	% of 580	国家
National Natural Science Foundation Of China Nsfc	91	15.663	中国
National Science Foundation Nsf	75	12.909	美国
Australian Research Council	38	6.54	澳大利亚
Nsf Directorate For Biological Sciences Bio	28	4.819	美国
Spanish Government	24	4.131	西班牙
Conselho Nacional De Desenvolvimento Cientifico E Tecnologico Cnpq	21	3.614	巴西
Uk Research Innovation Ukri	19	3.27	英国
European Union Eu	18	3.098	欧盟
Natural Sciences And Engineering Research Council Of Canada Nserc	15	2.582	加拿大
University Of Colorado At Boulder	13	2.238	美国

3.7. 文献共被引分析

通过对文献的梳理分析, 可以发现植物叶脉密度研究的基础文献和必要知识基础[42] [43]。本研究构建了由上述 580 篇论文的 9387 篇引用文献组成的聚合网络, 观察到 17 个关键的聚类集群(图 7 和表 6)。初始发展阶段的集群包括#5 (shade leave)、#6 (venation architecture)、#8 (leaf vein mutant)、#9 (fossil evidence), 处于稳定发展阶段的集群包括#2 (other key trait)、#4 (functional trait)和#3 (growth temperature)。在快速发育阶段, 包括#0 (leaf hydraulic efficiency)、#1 (loess plateau)、#7 (changing environment)。

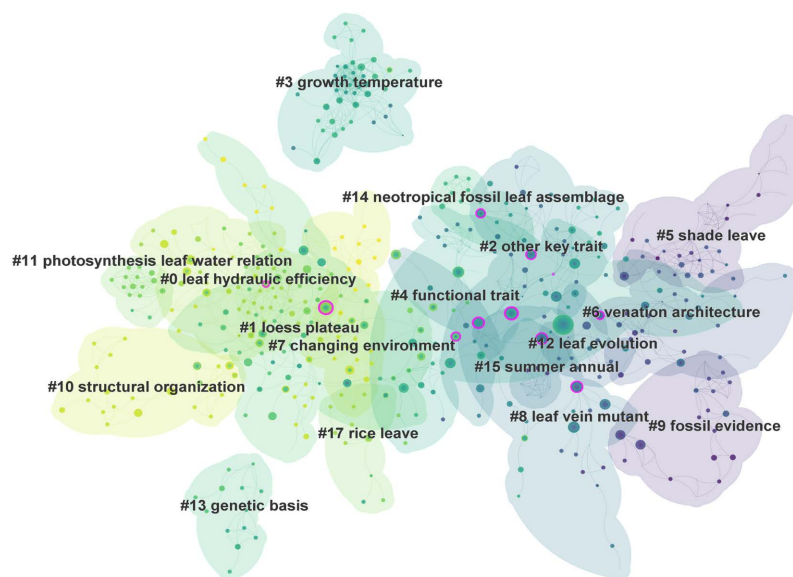


Figure 7. Keyword clustering co-occurrence map in the field of plant vein density research from 2008 to 2023

图 7. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域关键词聚类共现图谱

Table 6. The top 10 clusters in the field of plant research based on frequency from 2008 to 2023

表 6. 2008~2023 年间植物研究领域基于频数的前 10 个聚类

聚类编号	节点	轮廓值	标签(LLR)	平均引用年
0	64	0.88	leaf hydraulic efficiency	2017
1	60	0.867	loess plateau	2016
2	52	0.965	other key trait	2011
3	43	1	growth temperature	2013
4	36	0.931	functional trait	2012
5	36	0.983	shade leaf	2006
6	32	0.927	venation architecture	2008
7	30	0.934	changing environment	2019
8	27	0.971	leaf vein mutant	2010
9	23	0.987	fossil evidence	2008

注：一个轮廓为> 0.5 的聚类被认为是合理的。

#5 共有 36 个节点，轮廓值为 0.983，聚类分析表明，植物形态、功能和生态的许多其他方面可能相互作用，决定植物叶片水力结构的进化，以及特定植物群落中组装和持久的一组结构。叶解剖学中的分区可以极大地影响叶内的水流动和蒸发，潜在地改变叶脉结构和叶水力传导之间的关系；水流和扩散过程为预测解剖学如何限制植物水力和气体交换性能的最大极限提供了物理基础[44]。低 P50 值与更窄和更密集的静脉导管、管道壁厚度的增加以及静脉密度的增加有关[45]；#6 共有 32 个成员，轮廓值为 0.927。研究的重点是基于系统发育测试，次级脉型与叶经济性状之间的显著关系表明，性状组的选择与不同的脉型相关[46]；具有较高主脉密度的较小叶片对大脉栓塞的耐受性更强[47]，叶脉和叶片大小在确定水力脆弱性方面的这种作用具有重要的潜在生态和生物地理学意义。

#8 有 27 个成员, 轮廓值为 0.971, 分析了导管和气孔之间的联系导致潜在的最大水分损失(由气孔导度决定)与叶维管系统补充该水的能力之间的高效匹配[48]。#9 有 23 个成员, 轮廓值为 0.987。该集群主要研究植物与生态环境之间的相互作用, 例如: 在热带地区, 被子植物的蒸腾能力比整个进化史上的任何其他植物都高。因此, 开花植物的进化和生态优势的崛起被认为极大地改变了气候。蒸腾能力与叶脉密度密切相关, 被子植物叶子的平均叶脉密度比所有其他植物大四倍[49]。

#2 有 52 个成员, 轮廓值为 0.965, 该集群研究其他关键性状与叶脉密度之间的关系。研究发现, 蒸腾速率、叶脉密度、小脉气管元件数量和横截面积随着原产地降水量的减少呈线性增长[38]。#3 有 43 个成员, 轮廓值为 1。文章集中研究了生境温度对叶脉密度的影响, 表明在高温下生长的两个生态型拟南芥的叶脉密度显著高于低温, 而每个小脉的细胞数显著低于低温[50]; #4 有 74 个成员, 轮廓值为 0.902。文章集中研究了各叶片功能性状间的影响, 研究表明干旱地区的原种叶片厚度可塑性更大, 而降雨量较高地区的原种叶片大小可塑性更大。叶片密度和气孔生理机能的可塑性较高且均匀。除了平均性状值的变化外, 性状可塑性的遗传变异也可能在气候适应中发挥作用[51]。在这里, 我们可以发现研究从降水和温度外界因素逐渐深入到叶片厚度和叶片大小。

#0 有 64 个成员, 轮廓值为 0.88。该集群集中研究了叶片水力效率的影响, 研究表明, 在不同物种中, 叶片水力和机械特征都与失去张力时的水势以及叶片组织密度密切相关[52]。#1 有 60 个成员, 轮廓值为 0.867, 其相关研究表明, 在不同物种中, 叶片水力和机械特征都与失去张力时的水势以及叶片组织密度密切相关。#7 有 30 个成员, 轮廓值为 0.934, 主要分析叶脉密度与不同 VPD(饱和蒸汽压亏缺)的关系, 经研究表明在高低两种不同 VPD 条件下, 植物的气孔和叶脉都能保持协调发展, 在低 VPD 条件下, 气孔和叶脉的密度更高[44]。

3.8. 作者被引分析

Table 7. Top 10 frequency-based authors in plant research from 2008 to 2023

表 7. 2008~2023 年间植物研究领域基于频数的前 10 名作者

频数	作者	标题	期刊	年份	Bursts	中心性	集群
60	Sack, Lawren et al.	Leaf venation: structure, function, development, evolution, ecology and applications in the past, present and future	New Phytologist	2013	15.66	0	15
29	Boyce, C. K. et al.	Angiosperm leaf vein evolution was physiologically and environmentally transformative	Proceedings of The Royal Society B-Biological Sciences	2009	11.04	0	8
28	Sack, Lawren et al.	Developmentally based scaling of leaf venation architecture explains global ecological patterns	Nature Communications	2012	8.67	0.02	2
28	Brodribb, T. J. et al.	Leaf hydraulic evolution led a surge in leaf photosynthetic capacity during early angiosperm diversification	Ecology Letters	2010	9.46	0.09	15
26	Brodribb, T. J. et al.	Unified changes in cell size permit coordinated leaf evolution	New Phytologist	2013	7.19	0.01	2

续表

24	Brodribb, T. J. et al.	Leaf Maximum Photosynthetic Rate and Venation Are Linked by Hydraulics	Plant Physiology	2007	11.88	0.08	5
23	CarinsMurphy, M. R. et al.	Acclimation to humidity modifies the link between leaf size and the density of veins and stomata	Plant, Cell and Environment	2014	4.69	0.01	1
23	Brodribb, T. J. et al.	Water supply and demand remain balanced during leaf acclimation of <i>Nothofagus cunninghamii</i> trees	New Phytologist	2011	7.55	0.01	8
23	Blonder, B. et al.	Venation networks and the origin of the leaf economics spectrum	Ecology Letters	2011	7.55	0.1	2
22	Scoffoni C. et al.	Decline of Leaf Hydraulic Conductance with Dehydration: Relationship to Leaf Size and Venation Architecture	Plant Physiology	2011	7.22	0.02	2

突现值可以用来表示某一时间段内该出版物总被引频次的急剧增加。在这里，10篇被引频次最高的文献的burst值为4.69~15.66，说明这些文献是突然被大量引用的(表7)。在这10篇文章中，被引用次数最多的是Sack, Lawren et al.于2013年在New Phytologist上发表的文章。本文论证了被子植物的主要和次要叶脉系统形成了一个综合的运输网络，但在功能的许多方面以及它们的发育、演化和古历史方面互不关联；并且叶脉按照一种典型的算法发育的，在不同环境中表现出很强的、可预测的可塑性和适应性，从而形成了不同生长形式、生境和生物群落中叶脉性状的全球趋势[3]。

Boyce, C. K.等人在2009年发表于《Proceedings of The Royal Society B-Biological Sciences》的文章证明，被子植物独特的高叶脉密度能够实现无与伦比的蒸腾速率，扩展了先前的工作，表明叶脉密度和同化率之间存在很强的相关性[53]。Brodribb, T. J.在2007~2013年间发表4篇文章，主要研究被子植物叶脉密度进化的进程以及与光合作用之间的关系。在系统进化上，早期的陆生被子植物产生的叶子光合速率较低，但随后的被子植物的成功与其早期多样化过程中光合能力的激增有关[54]；在细胞组织结构上，在山龙眼科的系统发育范围内，保卫细胞、表皮细胞、栅栏细胞和木质部细胞的大小彼此呈正相关，但与静脉和气孔密度呈负相关[48]；在光合作用中，叶脉和气孔的发育是协调的，因此相对于叶脉中的碳投资而言，光合作用产量得到了优化[15][40]。总之，这六篇文章都对叶脉密度进行了详细的研究，证明了叶片密度可以通过叶片水力效率增强植物光合作用，这对研究领域具有重要意义。

3.9. 研究热点与前沿分析

3.9.1. 研究热点分析

关键词通常代表一篇文章的核心和主要内容[41][55]，它们的聚类图有效地反映了研究热点。在这里，我们观察到所构建的关键词时间线图谱中10个关键词聚类(图8)，所有聚类(0~10)的轮廓值都至少为0.7，说明这些聚类是合理的(表8)。#0和#5均关注光合作用和叶脉密度的深度研究，证实了叶脉密度的相关解剖特征可能限制了Moricandia中碳循环的进化[56][57]，以及被子植物进化过程中光合作用能力的激增也与叶脉密度有关[54]。#1研究表明较高的比叶质量的植物往往具有较大的细胞、较多的主脉分配、较多的叶肉细胞层数和较高的细胞密度[11]，这与植物的生理、进化、群落和宏观生态学中的各种过程均有关联。#2、#3、#4和#8，其轮廓值均在0.7以上，主要研究叶脉密度与比叶面积、叶片干物质含量、叶

片厚度的关系,证实叶脉密度可以预测叶片干物质含量[58]。同时,从水力学角度,解释了叶片结构的功能与演化[44]。#6 关注不同类型物种的功能差异,例如 Enrique G 等人研究表明常绿和落叶物种植物功能性状的差异是单位面积叶质量引起,而单位面积叶质量由叶脉密度和叶片厚度决定[59]。#7 和#9 深入研究水力脆弱性与叶脉密度的相关变化[60]以及枝叶水力结构产生相应变化以应对气候变化[61]。

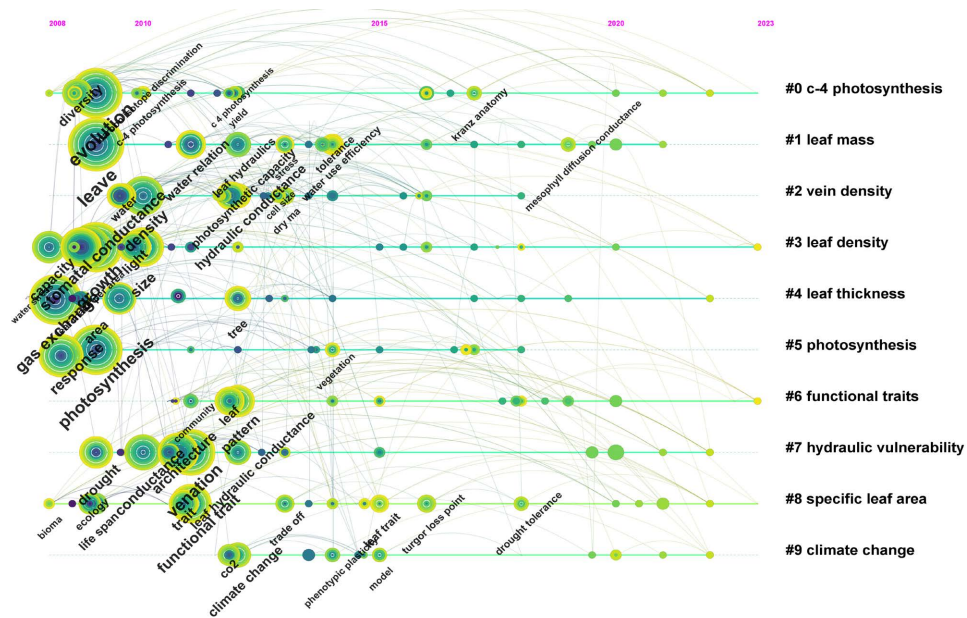


Figure 8. Keywords timeline map of plant leaf vein density research field from 2008 to 2023
图 8. 2008~2023 年间植物叶脉密度研究领域关键词时间线图谱

Table 8. The top 10 keyword clustering based on frequency in the field of plant research from 2008 to 2023
表 8. 2008~2023 年间植物研究领域基于频数的前 10 个关键词聚类

聚类标签	节点	轮廓值	平均引用年	标签(LSI)
0	32	0.892	2013	c-4 photosynthesis
1	31	0.84	2015	leaf mass
2	30	0.708	2013	vein density
3	29	0.891	2013	leaf density
4	28	0.832	2012	leaf thickness
5	26	0.917	2013	photosynthesis
6	26	0.877	2015	functional traits
7	26	0.85	2014	hydraulic vulnerability
8	25	0.813	2015	specific leaf area
9	21	0.783	2016	climate change

3.9.2. 研究发展趋势

关键词突发分析可以显示关键词引用频率的突然下降或上升,这反过来又反映出研究热点的重大转变[62]。在图 9 显示了每个突发关键字首次出现的时间及其在此字段中的持续时间。

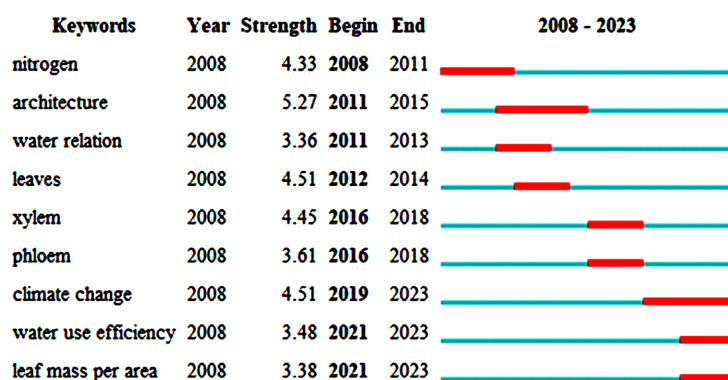


Figure 9. Keyword burst diagram of plant research field from 2008 to 2023

图 9. 2008~2023 年间植物研究领域关键词突现图

稳定发展阶段(2008 年~2013 年): 这一阶段出现了三个爆发关键词, 即氮元素、构建体系、水分关系。显然, 植物叶脉密度的研究刚刚进入发展阶段。研究对象主要是叶片经济学谱[63], 研究重点是叶脉几何的选择与气孔导度, 水分蒸腾亏缺和氮含量的影响。现阶段学者们主要关注植物叶片功能性状的适应策略。

快速发展阶段(2014 年~2018 年): 该阶段共涉及三个爆发关键词, 即植物叶片、木质部、韧皮部。研究对象已从植物叶脉密度与外界相互作用扩展到植物本身维管系统。主要对被子植物的叶脉密度进行了大量研究。同时强调了叶脉密度对于植物光合作用[54]和蒸腾作用[38]和水分胁迫的重要性。

深度发展阶段(2019 年~2023 年)该阶段涉及气候变化、水分利用效率、单位面积叶片质量三个关键词, 话题相对集中。这一时期的学者开始探索不同植物叶脉密度, 以便预测物种对气候变异性的响应[51] [64], 此方面相关研究一直持续至今, 是目前最前沿的研究课题。

4. 结论与展望

总体而言, 植物叶脉密度研究可分为三个阶段: 初始发展(2008~2013 年)、快速发展(2014~2018 年)和深度发展(2019~2023 年)。迄今为止, 它已在植物科学、生态学、环境科学、林学、农学、生物学和地球科学领域受到极大关注。《New Phytologist》《Plant Cell and Environment》《Plant Physiology》《Annals of Botany》《Journal of Experimental Botany》《Nature》被认为是有影响的期刊。Adams William W、Brodrribb Timothy J、Blonder Benjamin 和 Demmig-adams Barbara 是核心作者, 在发展和扩展该领域中发挥了至关重要的作用。美国是最具影响力的国家, 其次是德国、英格兰、中国和澳大利亚。

该知识库包括以下几个方面: a) leaf hydraulic efficiency (叶片水力效率); b) loess plateau (黄土高原); c) other key trait (其他关键性状); d) growth temperature (生长温度); e) functional trait (功能性状); f) shade leave (阴叶); g) venation architecture (静脉结构); h) changing environment (环境变化); i) leaf vein mutant (叶脉突变体); j) fossil evidence (化石证据)。Sack Lawren 等人, Boyce C. K 等人, Brodrribb T. J. 等人, Carins Murphy, M. R 等人, Blonder B 以及 Scoffoni C 等人。在基础知识的演变中发挥了至关重要的作用。在初始发展阶段, 植物叶脉密度及其他功能性状的适应策略是研究热点。在快速发展阶段, 叶脉密度对于植物光合作用、蒸腾作用以及水分胁迫是研究热点。在深度发展阶段, 不同类型植物具有不同的叶脉密度, 以便应对全球气候异常变化是研究前沿, 其中气候变化、水分利用效率、比叶面积是现阶段的研究热点。预计从分子水平上对植物叶脉密度的研究和改进将成为该领域的发展趋势。

总之, 我们的分析可以帮助学者准确把握植物叶脉密度的研究热点和前沿, 为深入研究植物叶脉密度提供可靠的理论基础。过去, 学者们对植物叶脉密度的基本特征和主要影响因素进行了大量的研究,

加深了人们对植物叶脉密度重要性的认识。未来,更多的研究应该集中在叶脉密度的分子机制而不是生理层面,这对于植物应对全球气候异常的变化起着至关重要的作用。

参考文献

- [1] Blonder, B., Both, S., Jodra, M., *et al.* (2020) Linking Functional Traits to Multiscale Statistics of Leaf Venation Networks. *New Phytologist*, **228**, 1796-1810. <https://doi.org/10.1111/nph.16830>
- [2] Roth-Nebelsick, A., Uhl, D., Mosbrugger, V., *et al.* (2001) Evolution and Function of Leaf Venation Architecture: A Review. *Annals of Botany*, **87**, 553-566. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1391>
- [3] Lawren, S. and Christine, S. (2013) Leaf Venation: Structure, Function, Development, Evolution, Ecology and Applications in the Past, Present and Future. *The New Phytologist*, **198**, 983-1000. <https://doi.org/10.1111/nph.12253>
- [4] Ronellenfitch, H. and Katifori, E. (2019) Phenotypes of Vascular Flow Networks. *Physical Review Letters*, **123**, Article ID: 248101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.248101>
- [5] Blonder, B., Salinas, N., Bentley, L.P., *et al.* (2018) Structural and Defensive Roles of Angiosperm Leaf Venation Network Reticulation across an Andes-Amazon Elevation Gradient. *Journal of Ecology*, **106**, 1683-1699. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12945>
- [6] Ohtsuka, A., Sack, L. and Taneda, H. (2018) Bundle Sheath Lignification Mediates the Linkage of Leaf Hydraulics and Venation. *Plant Cell and Environment*, **41**, 342-353. <https://doi.org/10.1111/pce.13087>
- [7] Katifori, E., Szollosi, G.J. and Magnasco, M.O. (2010) Damage and Fluctuations Induce Loops in Optimal Transport Networks. *Physical Review Letters*, **104**, Article ID: 048704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.048704>
- [8] Brodribb, T.J., Bienaime, D. and Marmottant, P. (2016) Revealing Catastrophic Failure of Leaf Networks under Stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**, 4865-4869. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522569113>
- [9] Agrawal, A.A. and Konno, K. (2009) Latex: A Model for Understanding Mechanisms, Ecology, and Evolution of Plant Defense against Herbivory. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, **40**, 311-331. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120307>
- [10] Givnish, T. (1979) On the Adaptive Significance of Leaf Form. In: Solbrig, O.T., Jain, S., Johnson, G.B., *et al.*, Eds., *Topics in Plant Population Biology*, Macmillan Education, London, 375-407. https://doi.org/10.1007/978-1-349-04627-0_17
- [11] John, G.P., Scoffoni, C., Buckley, T.N., *et al.* (2017) The Anatomical and Compositional Basis of Leaf Mass per Area. *Ecology Letters*, **20**, 412-425. <https://doi.org/10.1111/ele.12739>
- [12] 熊映杰, 于果, 魏凯璐, 等. 天童山阔叶木本植物叶片大小与叶脉密度及单位叶脉长度细胞壁干质量的关系[J]. 植物生态学报, 2022, 46(2): 136-147.
- [13] 李乐, 曾辉, 郭大立. 叶脉网络功能性状及其生态学意义[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 691-698.
- [14] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能[J]. 植物生态学报, 2007(1): 150-165.
- [15] Brodribb, T.J., Feild, T.S. and Jordan, G.J. (2007) Leaf Maximum Photosynthetic Rate and Venation Are Linked by Hydraulics. *Plant Physiology*, **144**, 1890-1898. <https://doi.org/10.1104/pp.107.101352>
- [16] Peng, G., Xiong, Y., Yin, M., *et al.* (2022) Leaf Venation Architecture in Relation to Leaf Size across Leaf Habits and Vein Types in Subtropical Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, **13**, Article ID: 873036. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.873036>
- [17] Hua, L., He, P., Goldstein, G., *et al.* (2020) Linking Vein Properties to Leaf Biomechanics across 58 Woody Species from a Subtropical Forest. *Plant Biology*, **22**, 212-220. <https://doi.org/10.1111/plb.13056>
- [18] 黄俊丽, 马娜娜, 车树刚, 等. 植物叶脉发育的分子机制[J]. 生命科学, 2011, 23(8): 804-811.
- [19] Sack, L. and Scoffoni, C. (2013) Leaf Venation: Structure, Function, Development, Evolution, Ecology and Applications in the Past, Present and Future. *New Phytologist*, **198**, 983-1000. <https://doi.org/10.1111/nph.12253>
- [20] Colmer, T.D., Winkel, A. and Pedersen, O. (2011) A Perspective on Underwater Photosynthesis in Submerged Terrestrial Wetland Plants. *Aob Plants*, **2011**, plr030. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plr030>
- [21] Yan, T., Xue, J., Zhou, Z., *et al.* (2020) The Trends in Research on the Effects of Biochar on Soil. *Sustainability*, **12**, Article No. 7810. <https://doi.org/10.3390/su12187810>
- [22] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [23] Zhang, Y., Li, C., Ji, X., *et al.* (2020) The Knowledge Domain and Emerging Trends in Phytoremediation: A Sciento-

- metric Analysis with CiteSpace. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 15515-15536. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07646-2>
- [24] Fang, J., Pan, L., Gu, Q.-X., *et al.* (2020) Scientometric Analysis of MTOR Signaling Pathway in Liver Disease. *Annals of Translational Medicine*, **8**, Article No. 93. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.12.110>
- [25] Wang, W. and Lu, C. (2020) Visualization Analysis of Big Data Research Based on Citespace. *Soft Computing*, **24**, 8173-8186. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04384-7>
- [26] Xu, Y.-Q. (2020) Digital Innovation Ecosystem: Research Context, Research Hotspot and Research Trends—Knowledge Mapping Analysis Using Citespace. *Journal of Electronics and Information Science*, **5**, 72-80
- [27] Xue, Y. (2021) The Research Status and Prospect of Global Change Ecology in the Past 30 Years Based on CiteSpace. *Advances in Environmental Protection*, **11**, 281-287. <https://doi.org/10.12677/AEP.2021.112029>
- [28] Shao, H., Kim, G., Li, Q., *et al.* (2021) Web of Science-Based Green Infrastructure: A Bibliometric Analysis in CiteSpace. *Land*, **10**, Article No. 711. <https://doi.org/10.3390/land10070711>
- [29] Yu, L. (2021) The Scientific Development of Ecosystem Service Values. 2021 7th International Engineering Conference “Research & Innovation amid Global Pandemic”, Erbil, 24-25 February 2021, 128-133. <https://doi.org/10.1109/IECS2205.2021.9476088>
- [30] 张爱霞, 周飞丽, 刘炼, 等. 基于 Web of Science 和 CiteSpace 的水稻育种研究热点与前沿分析[J]. 分子植物育种, 2023, 21(15): 5066-5078.
- [31] Mackinlay, J., Hanrahan, P. and Stolte, C. (2007) Show Me: Automatic Presentation for Visual Analysis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **13**, 1137-1144. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.70594>
- [32] Guo, J., Xue, J., Hua, J., *et al.* (2022) Research Status and Trends of Underwater Photosynthesis. *Sustainability*, **14**, Article No. 4644. <https://doi.org/10.3390/su14084644>
- [33] Ding, X. and Yang, Z. (2022) Knowledge Mapping of Platform Research: A Visual Analysis Using VOSviewer and CiteSpace. *Electronic Commerce Research*, **22**, 787-809. <https://doi.org/10.1007/s10660-020-09410-7>
- [34] 张会择, 赖宇. 基于 CiteSpace 的医学免疫学实验教学研究现状、热点及发展趋势的可视化分析[J]. 中国免疫学杂志, 2022(9): 1-9.
- [35] Stringer, M.J., Sales-Pardo, M. and Amaral, L.A.N. (2008) Effectiveness of Journal Ranking Schemes as a Tool for Locating Information. *PLOS ONE*, **3**, e1683. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001683>
- [36] Smith, D.R. (2009) A 30-Year Citation Analysis of Bibliometric Trends at the Archives of Environmental Health, 1975-2004. *Archives of Environmental & Occupational Health*, **64**, 43-54. <https://doi.org/10.1080/19338240903293004>
- [37] Cohu, C.M., Muller, O., Adams, W.W., *et al.* (2014) Leaf Anatomical and Photosynthetic Acclimation to Cool Temperature and High Light in Two Winter versus Two Summer Annuals. *Physiologia Plantarum*, **152**, 164-173. <https://doi.org/10.1111/ppl.12154>
- [38] Adams, W.W., Stewart, J.J., Cohu, C.M., *et al.* (2016) Habitat Temperature and Precipitation of Arabidopsis Thaliana Ecotypes Determine the Response of Foliar Vasculature, Photosynthesis, and Transpiration to Growth Temperature. *Frontiers in Plant Science*, **7**, Article No. 1026. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01026>
- [39] Carins Murphy, M.R., Jordan, G.J. and Brodribb, T.J. (2014) Acclimation to Humidity Modifies the Link between Leaf Size and the Density of Veins and Stomata. *Plant Cell and Environment*, **37**, 124-131. <https://doi.org/10.1111/pce.12136>
- [40] Brodribb, T.J. and Jordan, G.J. (2011) Water Supply and Demand Remain Balanced during Leaf Acclimation of Nothofagus Cunninghamii Trees. *New Phytologist*, **192**, 437-448. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03795.x>
- [41] Wu, J., Wu, X. and Zhang, J. (2019) Development Trend and Frontier of Stormwater Management (1980-2019): A Bibliometric Overview Based on CiteSpace. *Water*, **11**, Article No. 1908. <https://doi.org/10.3390/w11091908>
- [42] Li, X., Du, J. and Long, H. (2018) A Comparative Study of Chinese and Foreign Green Development from the Perspective of Mapping Knowledge Domains. *Sustainability*, **10**, Article No. 4357. <https://doi.org/10.3390/su10124357>
- [43] Hu, W., Li, C.-H., Ye, C., *et al.* (2019) Research Progress on Ecological Models in the Field of Water Eutrophication: CiteSpace Analysis Based on Data from the ISI Web of Science Database. *Ecological Modelling*, **410**, Article ID: 108779. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108779>
- [44] Brodribb, J.T., *et al.* (2010) Viewing Leaf Structure and Evolution from a Hydraulic Perspective. *Functional Plant Biology*, **37**, 488-498. <https://doi.org/10.1071/FP10010>
- [45] Nardini, A., Peda, G. and La Rocca, N. (2012) Trade-Offs between Leaf Hydraulic Capacity and Drought Vulnerability: Morpho-Anatomical Bases, Carbon Costs and Ecological Consequences. *New Phytologist*, **196**, 788-798. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04294.x>

- [46] Walls, R.L. (2011) Angiosperm Leaf Vein Patterns Are Linked to Leaf Functions in a Global-Scale Data Set. *American Journal of Botany*, **98**, 244-253. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000154>
- [47] Christine, S., Michael, R., Athena, M., *et al.* (2011) Decline of Leaf Hydraulic Conductance with Dehydration: Relationship to Leaf Size and Venation Architecture. *Plant Physiology*, **156**, 832-843. <https://doi.org/10.1104/pp.111.173856>
- [48] Brodribb, T.J., Jordan, G.J. and Carpenter, R.J. (2013) Unified Changes in Cell Size Permit Coordinated Leaf Evolution. *New Phytologist*, **199**, 559-570. <https://doi.org/10.1111/nph.12300>
- [49] Boyce, C.K., Lee, J.-E., Feild, T.S., *et al.* (2010) Angiosperms Helped Put the Rain in the Rainforests: The Impact of Plant Physiological Evolution on Tropical Biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **97**, 527-540. <https://doi.org/10.3417/2009143>
- [50] Stewart, J.J., Demmig-Adams, B., Cohu, C.M., *et al.* (2016) Growth Temperature Impact on Leaf Form and Function in Arabidopsis Thaliana Ecotypes from Northern and Southern Europe. *Plant Cell and Environment*, **39**, 1549-1558. <https://doi.org/10.1111/pce.12720>
- [51] Mclean, E.H., Prober, S.M., Stock, W.D., *et al.* (2014) Plasticity of Functional Traits Varies Clinally along a Rainfall Gradient in Eucalyptus Tricarpa. *Plant Cell and Environment*, **37**, 1440-1451. <https://doi.org/10.1111/pce.12251>
- [52] Mendez-Alonzo, R., Ewers, F.W., Jacobsen, A.L., *et al.* (2019) Covariation between Leaf Hydraulics and Biomechanics Is Driven by Leaf Density in Mediterranean Shrubs. *Trees-Structure and Function*, **33**, 507-519. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1796-7>
- [53] Boyce, C.K., Brodribb, T.J., Feild, T.S., *et al.* (2009) Angiosperm Leaf Vein Evolution Was Physiologically and Environmentally Transformative. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, **276**, 1771-1776. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1919>
- [54] Brodribb, T.J. and Feild, T.S. (2010) Leaf Hydraulic Evolution Led a Surge in Leaf Photosynthetic Capacity during Early Angiosperm Diversification. *Ecology Letters*, **13**, 175-183. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01410.x>
- [55] Yang, H., Shao, X. and Wu, M. (2019) A Review on Ecosystem Health Research: A Visualization Based on CiteSpace. *Sustainability*, **11**, Article No. 4908. <https://doi.org/10.3390/su11184908>
- [56] Schlueter, U., Braeutigam, A., Gowik, U., *et al.* (2017) Photosynthesis in C-3-C-4 Intermediate Moricandia Species. *Journal of Experimental Botany*, **68**, 191-206. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw391>
- [57] Kumar, D. and Kellogg, E.A. (2019) Getting Closer: Vein Density in C-4 Leaves. *New Phytologist*, **221**, 1260-1267. <https://doi.org/10.1111/nph.15491>
- [58] Hodgson, J.G., Montserrat-Marti, G., Charles, M., *et al.* (2011) Is Leaf Dry Matter Content a Better Predictor of Soil Fertility than Specific Leaf Area? *Annals of Botany*, **108**, 1337-1345. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr225>
- [59] De La Riva, E.G., Olmo, M., Poorter, H., *et al.* (2016) Leaf Mass per Area (LMA) and Its Relationship with Leaf Structure and Anatomy in 34 Mediterranean Woody Species along a Water Availability Gradient. *PLOS ONE*, **11**, e0148788. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148788>
- [60] Giraldo, J.P., Wheeler, J.K., Huggett, B.A., *et al.* (2014) The Role of Leaf Hydraulic Conductance Dynamics on the Timing of Leaf Senescence. *Functional Plant Biology*, **41**, 37-47. <https://doi.org/10.1071/FP13033>
- [61] Liang, X., He, P., Liu, H., *et al.* (2019) Precipitation Has Dominant Influences on the Variation of Plant Hydraulics of the Native *Castanopsis fargesii* (Fagaceae) in Subtropical China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **271**, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.043>
- [62] Huang, L., Zhou, M., Lv, J., *et al.* (2020) Trends in Global Research in Forest Carbon Sequestration: A Bibliometric Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **252**, Article ID: 119908. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119908>
- [63] Blonder, B., Violle, C., Bentley, L.P., *et al.* (2011) Venation Networks and the Origin of the Leaf Economics Spectrum. *Ecology Letters*, **14**, 91-100. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01554.x>
- [64] Malenovsky, Z., Turnbull, J.D., Lucieer, A., *et al.* (2015) Antarctic Moss Stress Assessment Based on Chlorophyll Content and Leaf Density Retrieved from Imaging Spectroscopy Data. *New Phytologist*, **208**, 608-624. <https://doi.org/10.1111/nph.13524>