

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201510034

引文格式: 严欢欢, 肖娟, 杨永清. 基于文献计量的植物雌雄异株研究进展 [J]. 广西植物, 2017, 37(5):661-674

YAN HH, XIAO J, YANG YQ. Bibliometric analysis of research on dieocious plant [J]. *Guihaia*, 2017, 37(5):661-674

基于文献计量的植物雌雄异株研究进展

严欢欢, 肖娟, 杨永清*

(重庆师范大学 生命科学学院, 植物环境适应分子生物学重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 雌雄异株植物是研究植物性别的理想材料, 同时作为生态系统的重要组成部分, 对生物多样性的维持与保护起着重要作用。该文从文献计量学角度综述了雌雄异株植物相关研究的进展。通过检索 Web of Science(WOS)平台的 SCI-E 数据库和 CNKI 数据库的有关雌雄异株研究的文献数据, 从文献年代分布、期刊分布、研究国家与机构、核心作者和高引论文等方面进行了分析, 并借助 Citespace III 信息可视化软件绘制雌雄异株植物研究的科学知识图谱, 总结了雌雄异株研究的热点和前沿。结果表明: WOS 数据库中, 雌雄异株植物研究呈现快速上升趋势, 就发文总量来看, 发文前五的国家为美国、日本、加拿大、英格兰和中国。其中, 美国发文量占比为 31.03%; 中国科学院为发文量最多的机构, 发文占比 3.36%, 其次为牛津大学(2.613%), 多伦多大学位列第三(2.427%); 中国、巴西和印度三国, 西班牙马萨里克大学和北京林业大学两个研究机构近 5 年来在该领域发文增量较快。论文主要集中在植物科学、环境科学与生态学和遗传学等学科。载文量前十位的期刊累计载文占比高达 24.13%, 发文量最多的期刊为 *American Journal of Botany*, 占总发文量的 6.07%, 其次为 *Evolution* (2.80%), *Annals of Botany*(2.52%) 排名第三。发文最多的作者为捷克科学院的 VYSKOT B, 发文占总数的 2.57%, 高引论文大多出自美国学者之手。从 CNKI 数据库看, 西华师范大学、北京林业大学和河南师范大学发文数量位列前三, 发文量最高的期刊为《生命世界》, 占总发文量的 3.00%。综合 Web of Science 和 CNKI 两大数据库的文献来看, 青杨和番木瓜作为研究雌雄异株植物的模式植物, 近年发文较多。当前的研究热点主要集中在雌雄性别决定, 繁殖代价, 雌雄个体对环境因子的响应差异等方面。

关键词: 雌雄异株, 文献计量分析, Web of Science, CNKI, Citespace III

中图分类号: G453.129 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)05-0661-14

Bibliometric analysis of research on dieocious plant

YAN Huan-Huan, XIAO Juan, YANG Yong-Qing*

(*School of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing Key Laboratory of Molecular Biology of Plant Environmental Adaptations, Chongqing 401331, China*)

Abstract: Dieocious plants provide ideal materials to study sex determination of plant. Meanwhile, as a component of ecosystem, dieocious plants play a very important role in maintenance and conservation of biodiversity. Bibliometric analysis is a useful method for characterizing scientific research in various fields, which can be used for making decisions regarding scientific development. In the present paper, research progress related to dieocious plant was evaluated based on bibliometric analysis by retrieving articles from Science Citation Index Expanded (SCI-E) via Web of Science and CNKI databases. Yearly distribution, journals, countries/institutions, core authors and highly cited published articles were an-

收稿日期: 2016-03-27 修回日期: 2016-04-25

基金项目: 国家“973”计划前期研究专项(2014CB160306); 重庆市科委自然科学基金(cstc2012jjA00011) [Supported by the 973 Prophase Program (2014CB160306); Natural Science Foundation Project of CQ CSTC (cstc2012jjA00011)]。

作者简介: 严欢欢(1991-), 女, 重庆南川人, 硕士研究生, 主要从事植物分子生物学研究, (E-mail) 601709244@qq.com。

*通信作者: 杨永清, 博士, 教授, 从事环境植物学研究, (E-mail) yangyq2k@aliyun.com。

alyzed. Furthermore, research hotspots and frontiers were summarized on knowledge domain generated by Citespace III information visualization software. The results showed that in Web of Science, publication output exhibited a rapid growth by year, especially in recent years. The top five most productive countries were USA, Japan, Canada, England and China, among which, USA exceeded all world regions in research production for the period studied (31.03% of total articles), Chinese academy of sciences is the predominant institute which contributed 3.36% of total publications in this field, followed by University of Oxford (2.613%), and University of Toronto (2.427%) ranked the third. China, Brazil and India were the most active countries, while Beijing Forestry University and Masaryk University (Spain) were the most active institutes in the recent five years. According to the classification of journals in Web of Science, the top three subjects with the most articles published related to dieocious plant were plant sciences, environmental Sciences & Ecology and Genetics & Heredity. The top 10 journals contributed 24.13% of total articles, in which *American Journal of Botany* was the predominant journal that published 6.07% of total articles, with *Evolution* ranking second (2.80%) and followed by *Annals of Botany* (2.52%). VYSKOT B (from Academy of Sciences of the Czech Republic) was the leading author who contributed 2.57% of total articles, however, the most high cited articles were published by authors from USA. In CNKI, the top three core institutions were China west Normal University, Beijing Forestry University and Henan Normal University, and the first top productive journal was *Life Word* (3.00%). Based on the results from Web of Science and CNKI databases, publications on *Populus-cathayana* and Papaya had a higher volume in recent years. Researches on mechanism of sex determination, cost of reproduction, gender-specific response to environmental factors are the mainly research topics.

Key words: dieocious plant, bibliometric analysis, Web of Science, CNKI, Citespace III

被子植物中约 7% 的属 (959 / 13 500) 和 6% 的种 (14 620 / 240 000) 具有雌雄异株现象 (Renner & Ricklefs, 1995), 在热带森林中, 雌雄异株现象占木本植物的比例可高达 36% (Matallana et al, 2005)。雌雄异株植物作为陆地生态系统的重要组成部分, 对生物多样性保护和生态系统稳定性的维持起着极其重要的作用 (陈娟和李春阳, 2014)。自从达尔文时代起, 雌雄异株一直是个持续的研究热点。

本研究采用文献计量学的分析方法, 从文献数量、年代分布、研究学科分布、研究机构、核心作者、高引论文和期刊刊源分布等方面着手, 通过分析 Web of Science (WOS, Sci-expanded) 和 CNKI 数据库收录的国内外雌雄异株植物研究文献资料, 在泛读的基础上, 探讨国际、国内雌雄异株植物相关研究现状, 揭示其研究发展趋势, 以期为国内雌雄异株相关领域的理论研究、物种保护和农林业生产提供参考, 促进相关领域的发展。

1 文献采集与信息处理

在 Web of Science (WOS, Sci-expanded) 数据库中, 以“dieocious AND plant”或者“dioecy AND plant”为主题进行检索, 共获得文献 2 143 篇。其中, 研究论文 (article) 为 1 996 篇, 占总文献的 93.14%; 综述

(review) 为 103 篇, 占 4.806%。文献中英文文献共计 2 098 篇, 占 97.9%。鉴于研究论文和英文文献占总文献数量的比例很高, 在接下来的统计分析中未将文献类型进一步细分, 仅按总数进行统计。

以同样的检索词对中国学者雌雄异株相关研究的数据进行统计分析。以《中国知网》(CNKI) 的中国期刊全文数据库为资料来源, 采取“高级检索”方法, 以“雌雄异株”为主题词进行检索, 先以选择期刊来源为全部期刊, 共获得 1952—2014 年的文献 1 186 篇, 剔除无效信息后共计有效论文 1 132 篇; 为了得到发表在核心以上期刊的信息, 又以同样的主题词, 选择期刊来源类别为: 核心期刊, 共获得从 1992—2014 年的文献 252 篇。文献数据更新时间为 2015 年 4 月 15 日, 文献的年代分布仅统计到 2014 年以前的数据。

运用文献计量学方法, 统计文献发表年代数量变化、出版来源、发文国家/机构、学科类别、核心作者及高引用论文情况等指标, 并借助 CiteSpace 信息可视化软件绘制科学知识图谱 (本文所用版本为 CiteSpace III 3.9 R6) (Chen, 2006), 通过对该软件发现的关键引文节点精读的基础上总结雌雄异株相关文献的特征和规律, 分析雌雄异株研究的热点和研究前沿问题。

2 结果与分析

2.1 雌雄异株研究发文量趋势

检索到雌雄异株相关研究文献的文献量及年代分布见图 1。WOS 数据库中, 最早的文献发表于 1969 年, 此后一直到 1990 年, 年发文量时断时续, 且都没有超过 10 篇, 但从 1991 年开始呈现爆发式增长, 达到 49 篇, 此后呈现小幅波动而快速增长的趋势, 2014 年发文量已高达 142 篇。中国学者发表在 SCI 期刊的论文从 2002 年开始, 起步较晚, 但总体呈现快速增长势头, 2014 年发文量已达 26 篇, 占当年总发文量的 18.57%。CNKI 数据库中, 检索到的首篇论文发表于 1952 年, 但此后发文量时断时续直到 1979 年发文量都在 10 篇以下, 1980 出现爆发式增长之后的三十多年时间内, 发文量总体呈现震荡而缓慢增长态势, 年发文量均在 20~40 篇之间波动。在核心刊物上发表的文献数量在 1992—2000 年的近十年间, 无论发文总数还是核心占比都出现了大幅下滑, 之后逐渐上升, 2014 年核心期刊发文占比高达 50%, 为历史最高水平(图 2), 表明该领域的研究兴趣出现回暖迹象。

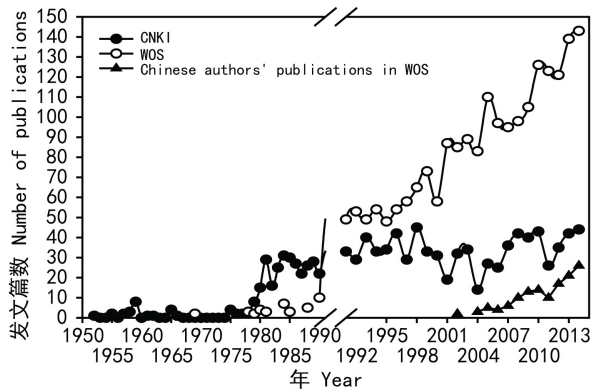


图 1 雌雄异株研究论文在 Web of Science 和 CNKI 数据库中的年度分布

Fig. 1 Yearly distribution of publications on dioecious plant in Web of Science and CNKI databases

2.2 雌雄异株研究的国家和科研机构分布

根据 WOS 数据库, 从事雌雄异株研究的国家和科研机构分布见表 1。发文前十位的国家分别是美国、日本、加拿大、英格兰、中国、法国、西班牙、德国、澳大利亚和印度。其中, 美国发文量遥遥领先, 占比

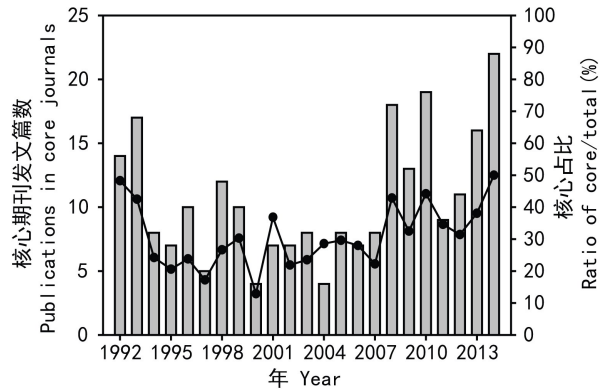


图 2 雌雄异株研究论文发表在图 1 CNKI 数据库中核心期刊的数量及其在总数据库中的占比

Fig. 2 Number and ratio of publications on dioecious plant in core journals in CNKI database

31.03%; 中国排名第五, 发文 142 篇, 占比 6.63%。发文前十位的机构中, 中国科学院发文最多 (72 篇), 占总发文量的 3.36% 和中国总发文量的 50.70%。排名前十的机构依次为牛津大学、多伦多大学、印第安那大学、东京大学、京都大学、墨西哥国立自治大学、爱丁堡大学、赫尔辛基大学和法国科学院。值得注意的是, 中国、巴西和印度三国, 西班牙马萨里克大学和北京林业大学两个研究机构近年来在该领域展现较高的突现度, 表明其发文增量较快(表 2)。中国学者从事雌雄异株的相关研究的机构见表 1, 其中发表 SCI 论文较多的机构分别为中科院, 北京林业大学, 河南师范大学, 四川农业大学等单位。从 CNKI 数据库来看, 西华师范大学、北京林业大学、河南师范大学和中科院西双版纳热带植物园发文较多, 占比均超过 1%。

2.3 雌雄异株研究文献的学科方向和期刊来源分布

雌雄异株相关研究文献在 WOS 数据库中主要分布在植物科学 (Plant Sciences)、环境科学与生态学 (Environmental Sciences Ecology)、遗传 (Genetics Heredity)、进化生物学 (Biotechnology Applied Microbiology)、生化与分子生物学 (Evolutionary Biolog)、农学 (Agriculture) 等领域; CNKI 数据库中, 发文的学科分布则主要集中在园艺、林业、生物学和农作物四个领域(表 3)。WOS 中, 载文量前十位的期刊累计载文占比 24.13%, 其中 American Journal of Botany 载文量 6.066%, 远远高于其他杂志。从期刊质量看, 载文量前十的期刊中大都为植物、进化或生态学领域主流或者声誉较好的老牌杂志, 其中影响因子

表 1 Web of Science 和 CNKI 数据库中雌雄异株研究发文量前十位的国家和机构

Table 1 Top ten countries and institutions producing publications on diecious plant in Web of Science and CNKI databases

排名 Rank	国家 Country	WOS 数据库 WOS Database			CNKI 数据库 CNKI Database				
		文献数量 Number of publication	比例 Percentage (%)	机构 Organization	文献数量 Number of publication	比例 Percentage (%)	机构 Organization	文献数量 Number of publication	比例 Percentage (%)
1	USA	665	31.031	Chinese Acad Sci	72	3.360	西华师范大学 China West Normal Univ	19	1.68
2	JAPAN	190	8.866	Univ Oxford	56	2.613	北京林业大学 Beijing Forestry Univ	19	1.68
3	CANADA	161	7.513	Univ Toronto	52	2.427	河南师范大学 Henan Normal Univ	18	1.59
4	ENGLAND	150	7.00	Indiana Univ	45	2.100	中科院西双版纳热带植物园 Xishuangbanna Trop Bot Gard, Chinese Acad Sci	13	1.15
5	CHINA	142	6.625	Univ Tokyo	45	2.100	中科院植物研究所 Inst Bot, Chinese Acad Sci	8	0.71
6	FRANCE	133	6.206	Kyoto Univ	42	1.960	南京林业大学 Nanjing Forestry Univ	8	0.71
7	SPAIN	131	6.113	Univ Nacl Autonoma Mexico	33	1.540	中国农业科学院特产研究所 Inst Spec Wild Econ Anim Plants, Chinese Acad Agr Sci	7	0.62
8	GERMANY	92	4.293	Univ Edinburgh	32	1.493	华东师范大学 East China Normal Univ	7	0.62
9	AUSTRALIA	81	3.780	Univ Hlsinki	32	1.493	福建农学院 Fujian Agr Univ	7	0.62
10	BRAZIL	73	3.406	Cnrs *	31	1.447	浙江林学院 Zhejiang Forestry Univ	7	0.62

* CNRS: Centre national de la recherche scientifique (法国国家科学研究院)

表 2 2002—2015 年间 Web of Science 数据库中雌雄异株研究高突现关键词, 国家与机构

Table 2 Top key words, countries and institutions with the strongest citation bursts on diecious plant in Web of Science during 2002—2015

关键词 Key words	突现强度 Strength	突现起始年限 Begin	突现结束年限 End	国家/机构 Country/Organization	突现强度 Strength	突现起始年限 Begin	突现结束年限 End
Rapd	5.092 8	2002	2004	AUSTRALIA	4.173 6	2002	2003
Female flowers	3.745 1	2002	2005	JAPAN	4.976 6	2002	2006
Genes	3.483 6	2002	2004	SPAIN	4.976 6	2004	2006
Expression	3.411 4	2002	2003	BRAZIL	4.053 4	2011	2013
Resource-allocation	3.343 8	2002	2006	INDIA	5.969 7	2010	2015
Sequence	2.865 6	2006	2009	CHINA	18.483 8	2012	2015
Plant populations	4.481 9	2009	2011				
Costs	3.121 9	2010	2013	Univ Oviedo	3.713 9	2002	2005
<i>Populus cathayana</i>	4.294 7	2011	2015	Acad Sci Czech Republ	3.087 3	2002	2004
Papaya	3.571 5	2013	2015	Univ Toronto	2.730 5	2003	2004
				Univ Oxford	2.996 4	2006	2011
雌雄异株 Diecious	11.291 5	2007	2015	Univ Zurich	3.188 4	2007	2009
青杨 <i>Populus cathayana</i>	3.539 7	2009	2015	Beijing Forestry Univ	3.402 6	2012	2015
				Masaryk Univ	2.84	2013	2015

表 3 Web of Science 和 CNKI 数据库中雌雄异株研究学科分布

Table 3 Subject distribution of publications on dioecious plant in Web of Science and CNKI databases

排名 Rank	WOS 数据库 WOS Database			CNKI 数据库 CNKI Database		
	学科/研究方向 Subject	文献数量 Number of publication	比例 Percentage (%)	学科/研究方向 Subject	文献数量 Number of publication	比例 Percentage (%)
1	Plant Sciences	1 006	46.944	园艺 Horticulture	385	34.01
2	Environmental Sciences Ecology	669	31.218	林业 Forestry	331	29.24
3	Genetics Heredity	405	18.899	生物学 Biology	194	17.14
4	Evolutionary Biology	395	18.432	农作物 Crop Science	146	12.90
5	Biochemistry Molecular Biology	150	7.000	中药学 Chinese Materia Medica	41	3.62
6	Agriculture	137	6.393	植物保护 Plant Protection	18	1.59
7	Marine Freshwater Biology	99	4.620	蜜蜂与野生动物保护 Bee & Wildlife Conservation	15	1.33
8	Forestry	93	4.340	轻工业手工业 Light Industry & Handicraft Industry	14	1.24
9	Science Technology Other Topics	70	3.266	农业经济 Agricultural Economy	13	1.15
10	Biotechnology Applied Microbiology	66	3.080	畜牧与动物医学 Animal Husbandry and Animal Medicine	11	0.97

3.0 以上的占 6/10, 表明该领域研究普遍受到国际主流期刊的青睐; 从 CNKI 数据库看, 发文量前 10 名(含并列)的期刊发文量占 18.82%, 发文期刊不如 WOS 集中, 而其中被 CSCD/核心数据收录期刊仅占 30%, 虽然其中本领域较好的《生态学报》发文量进入前七名(表 4), 亦显示国内生态学杂志对该领域研究的浓厚兴趣, 但与国际 SCI 杂志相比, 其余核心刊物对该领域的重视仍有待提升。

2.3 雌雄异株研究文献的核心作者与高引用频次论文

运用普莱斯定律(丁学东, 1992), 依据公式 $M = 0.749(N_{\max})$, 计算出核心作者发表论文数的门槛值 M , 式中, N_{\max} 为所统计时段中最高产的作者论文数。WOS 数据库中, 发文最多的作者为捷克科学院的 VYSKOT B, 发文 55 篇, 则 $M_{\text{WOS}} = 5.55$, 发文数量 6 篇及以上者为核心作者; CNKI 数据库中, 发文最多的作者为河南师范大学的卢龙斗和邓传良, 发文量均为 17 篇, 因此计算 $N_{\text{CNKI}} = 3.09$, 则发文量超过 4 篇的都进入核心作者群。由于雌雄异株相关研究的

核心作者较多, 本文仅列出 WOS 中发文数量排名前 20 位(含并列)的作者和 CNKI 数据库中发文数量 5 篇及以上者。WOS 中发文量较多的作者主要来自捷克、加拿大、日本、英国、美国、中国、法国、西班牙、瑞士和德国等国家, 其中中国科学院李春阳(LI CY)研究员跻身该领域前 14 名, 发文量占中国学者 SCI 发文量的 14.08% 和中科院发文量的 27.78%, 为中国学者在该领域的绝对核心作者; CNKI 中, 除卢龙斗和邓传良外, 河南师范大学的高武军、西华师范大学的胥晓、北京林业大学的张春雨以及西双版纳热带植物园的杨大荣等排名前五, 发文量均在 10 篇以上(表 5)。排名前十位的高引用论文在 WOS 中集中于 1980—1990 年的研究成果, 引用频次都接近或超过 200 次(表 6), 美国学者的高引论文最多, 占 5/10; CNKI 中排名前十位的高引用论文主要集中在 2000 年左右(表 7)。

2.4 雌雄异株研究的热点与前沿

研究热点是在某一时间段内, 有内在联系、数

表 4 Web of Science 和 CNKI 数据库中雌雄异株研究发文量前十位的期刊
Table 4 Top ten journals publishing articles on dioecious plant in Web of Science and CNKI databases

排名 Rank	WOS 数据库 WOS Database				CNKI 数据库 CNKI Database				
	期刊 Journal	发文 数量 Publica- tion	比例 Percent- age (%)	IF * IF *	期刊 Journal	发文 数量 Publica- tion	占比 Percent- age (%)	期刊类型 Journal type	IF * IF *
1	American Journal of Botany	130	6.066	2.463	生命世界 Life World	34	3.00		0.045
2	Evolution	60	2.800	4.659	林业实用技术 Practical Forestry Technology	30	2.65		0.265
3	Annals of Botany	54	2.52	3.295	园林 Garden	23	2.03		0.741
4	Plant Systematics and Evolution	50	2.333	1.154	中国林业 Chinese Landscape Architecture	20	1.77		0.117
5	Journal of Ecology	47	2.17	5.694	浙江林业 Zhejiang Forestry	16	1.41		-
6	International Journal of Plant Sciences	45	2.193	1.69	内蒙古林业 Inner Mongolia Forestry	14	1.24		0.082
7	American Naturalist	34	1.587	4.454	生态学报 Acta Ecologica Sinica	14	1.24	CSCD/ 北大核心	2.351
8	Oecologia	34	1.587	3.248	浙江林业科技 Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology	13	1.15	北大核心	1.133
9	Journal of Evolutionary Biology	32	1.493	3.483	农村科技 Rural Science & Technology	13	1.15		0.070
10	Journal of Aquatic Plant Management	31	1.447	0.256	中国水土保持 Soil and Water Conservation in China	12	1.06		0.490
10					中国林副特产 Forest By-Product and Speciality in China	12	1.06		0.321
10					植物分类与资源学报 Plant Diversity and Resources	12	1.06	CSCD/ 北大核心	0.677
总计 Total		517	24.13			213	18.82		

* IF SCI 期刊的影响因子来自 JCR2013, 中文期刊的影响因子通过 <http://www.istic.ac.cn/> 获得。

量相对较多的一组论文所探讨的科学问题或专题。从文献计量学角度看,在某学科领域被引频次最高的研究型文献通常是该领域研究热点的集中体现。CiteSpace 是一款用于可视化分析科学文献趋势和范式的计量学软件,其绘制的科学知识图谱能够显示某一学科或科学主题在某一时段的发展趋势与动向,形成若干研究前沿领域的演进历程,其提供的突现检测(burst detection)功能通过考察词频的时间分布,将那些频次变化率高、增长速度快的突现词(burst terms)从大量的主题词中检测出来,用词频的变动趋势(而不仅仅是词频累计的高低),来反应出学科的前沿领域和发展趋势(Chen, 2006)。由于中国学者始于 2002 年发表雌雄异株植物相关研究在 WOS 数据库上,为了便于比较和提炼该领域最新的研究热点,我们利用 Citespace 软件绘制了 2002—

2015 年间 WOS 数据库雌雄异株研究文献的共引知识图谱,关键词共现图谱和 CNKI 数据文献的关键词共现图谱,并总结了近年来突现度高的文献、关键词、国家和机构。

为研究本领域内共同被引用的频次较高的文献情况,本文利用 CiteSpace 信息可视化软件绘制了 WOS 数据库中雌雄异株研究的共被引文献网络图谱(图 3)。在 CiteSpaceIII 界面中选中 Node Types 为“cited reference”,设置单个时间分区长度(time slicing)的值为 1,整个时间跨度为 2002—2015 年,数据抽取对象为 Top30,选择网络精简(pathfinder)。图中每个节点代表一篇文献,节点向外延伸的圆圈厚度显示了该文献被引用频次的高低,节点之间连线说明文献之间存在共同被其他文献引用的关系。图 3 中的重要文献(即各节点)构

表 5 Web of Science 和 CNKI 数据库中雌雄异株研究核心作者分析

Table 5 Core authors publishing articles on dioecious plant in Web of Science and CNKI databases

WOS 数据库 WOS Database					CNKI 数据库 CNKI Database				
排名 Rank	作者 Author	机构 Organization	发文数量 Number of publication	比例 Percentage (%)	排名 Rank	作者 Author	机构 Organization	发文数量 Number of publication	比例 Percentage (%)
1	VYSKOT B	Academy of Sciences of the Czech Republic	55	2.57	1	卢龙斗 LU LD	河南师范大学 Henan Normal Univ	17	1.50
2	BARRETT SCH	Univ Toronto, Canada	46	2.15	1	邓传良 DENG CL	河南师范大学 Henan Normal Univ	17	1.50
3	KAWANO S	Univ Tokyo, Japan	39	1.82	3	高武军 GAO WJ	河南师范大学 Henan Normal Univ	14	1.24
4	PANNELL JR	Univ Oxford, UK	37	1.73	4	胥晓 XU X	西华师范大学 China West Normal Univ	12	1.06
5	CHARLESWORTH D	Univ Edinburgh, UK	32	1.49	5	张春雨 ZHANG CY	北京林业大学 Beijing Forestry Univ	10	0.88
6	DELPH LF	Indiana Univ, USA	30	1.39	5	杨大荣 YANG DR	中科院西双版纳 热带植物园 Xishuangbanna Trop Bot Gard, Chinese Acad Sci	10	0.88
7	HOBZA R	Academy of Sciences of the Czech Republic	26	1.21	7	赵秀海 ZHAO XH	北京林业大学 Beijing Forestry Univ	8	0.71
7	KORPELAINEN H	Univ Helsinki, Finland	26	1.21	8	姬艳克 JI YK	河南师范大学 Henan Normal Univ	7	0.62
7	MATSUNAGA S	Osaka University, Japan	26	1.21	8	彭艳琼 PENG YQ	中科院西双版纳 热带植物园 Xishuangbanna Trop Bot Gard, Chinese Acad Sci	7	0.62
10	ASHMAN TL	Univ Pittsburgh	24	1.12	10	郇慧慧 HUAN HH	西华师范大学 China West Normal Univ	6	0.53
10	KEJNOVSKY E	Academy of Sciences of the Czech Republic	24	1.12	10	王碧霞 WANG BX	西华师范大学 China West Normal Univ	6	0.53
12	KAZAMA Y	RIKEN Nishina Center, Japan	22	1.03	12	李宏庆 LI HQ	华东师范大学 East China Normal Univ	5	0.44
13	NEGRUTIU I	Centre National de la Recherche Scientifique, France	21	0.98	12	马炜梁 MA WL	华东师范大学 E China Normal Univ	5	0.44
14	DORKEN ME	Univ Toronto, Canada	20	0.93	12	赵亚洲 ZHAO YZ	北京林业大学 Beijing Forestry Univ	5	0.44
14	LI CY	Chinese Academy of Sciences, China	20	0.93	12	赵云云 ZHAO YY	首都师范大学 Capital Normal Univ	5	0.44
16	MCLETCHIE DN	Univ Kentucky, USA	18	0.84	12	黄尤优 HUANG YY	西华师范大学 China West Normal Univ	5	0.44
16	VERDU M	CSIC-UV-GV*, Spain	18	0.84	12	刘捷平 LIU JP	首都师范大学 Capital Normal Univ	5	0.44
18	JANOUSEK B	Academy of Sciences of the Czech Republic	17	0.79					
19	BERNASCONI G	Univ Lausanne, Switzerland	15	0.70					
19	EPPLEY SM	Univ Oxford, UK.	15	0.70					
19	MEAGHER TR	Rutgers Univ, USA	15	0.70					
19	SAKAI AK	Tohoku Univ, Japan	15	0.70					
23	RENNER SS	Univ Munich, Germany	14	0.65					

* CSIC-UV-GV: Centro de Investigaciones sobre Desertificación

表 6 Web of Science 数据库中雌雄异株研究引用频次前十位的论文
Table 6 List of top ten high cited articles on dioecious plant in Web of Science database

排名 Rank	作者 Author	论文题目 Article title	引用频次 Cited time	第一作者国家 Country	发表期刊名称 Journal	发表年度 Published year
1	BAWA KS	Evolution of dioecy in flowering plants	566	USA	Ann Rev Ecol Syst	1980
2	OBESO JR	The costs of reproduction in plants	410	SPAIN	New Phytol	2002
3	WESTERGAARD, M	The mechanism of sex determination in dioecious flowering plants	403	DENMARK	Adv Genet Inc Mol Genet Med	1958
4	RENNER SS	Dioecy and its correlates in the flowering plants	390	GERMANY	Am J Bot	1995
5	FREEMAN DC	Differential resource utilization by sexes of dioecious plants	334	USA	Science	1976
6	HERRERA CM	Recruitment of a mast-fruited, bird-dispersed tree—bridging frugivore activity and seedling establishment	306	SPAIN	Ecol Monogr	1994
7	DEJONG, TJ	Geitonogamy—the neglected side of selfing	239	NETHERLANDS	Trends Ecol Evol	1993
8	DAWSON TE	Gender-specific physiology, carbon isotope discrimination, and habitat distribution in boxelder, acer-negundo	235	USA	Ecology	1993
9	BIERZYCHUDEK P	Spatial segregation of the sexes of dioecious plants	203	USA	Am Nat	1988
10	GIVNISH TJ	Ecological constraints on the evolution of breeding systems in seed plants—dioecy and dispersal in gymnosperms	183	USA	Evolution	1980

成了国际上进行雌雄异株研究最重要的知识基础,节点圆圈的色彩逐渐变红说明人们对这一主题的兴趣在随时间逐渐增强,自 2002 年至今,这一研究领域在国际上一直受到关注,研究主题主要集中在繁殖分配、种群结构、性别分化、性别连锁基因和遗传图谱几个聚类。从突现度前 20 位的文献(表 8)可以看出,15/20 的关键文献的突现度持续到当前,这些研究热点构成了当今的研究前沿。

在 Citespace III 中的 Node Types 面板中选中“Term”和“keywords”,分析时间段为 2002–2015 年,“Time Scaling”值为 1,得到雌雄异株领域文献研究的关键词共现时区图谱(图 4)。从图 4 可以看出,2002—2005 年间,研究热点关键词主要为进化(evolution)、种群(population)、性比(sex ratio)和种群结构(population structure)等,2006—2008 年间,主要为性别二态性(sexual-dimorphism)、花粉限制(pollen limitation)、遗传多样性(genetic diversity)、序列分析(consequences)、树木(trees)等,2009—2012 年间主要为保护(conservation)、性染色体(sex chromosomes)、灌木(shrub)、复叶槭(acer-negundo)、共生(mutualism)、分子标记(molecular marker)、雄性不育(male-sterility)和系统发生分析(phylogenetic analysis),2013—2015 主要集中在风媒传粉(wind pollination)、性染色体(sex chromosome)、群落(communities)、非生物胁迫(abiotic stress)和青杨(populus-

cathayana)等主题或领域。我国学者的研究热点则主要集中在性别决定(sex determination)、性别差异(sex difference)、青杨(populus-cathayana)和干旱(drought)等方面(图 5)。CNKI 数据库中研究热点主要集中在“青杨”、“性比”、“银杏”、“性别鉴定”、“风媒传粉”和“人工授粉”等方面(图 6)。通过对高突现文献分析可以发现各时期的研究前沿(表 2),2002–2006 年间为多态性、性别相关基因的表达分析和资源分配等;2006—2011 年间主要为序列分析和代价等;2010 年至今则为植物种群、青杨和番木瓜。CNKI 中则主要以青杨为研究对象展开各类研究。

结合对关键节点和高突现文献及其施引文献的阅读,我们认为当前国内外有关植物雌雄异株的研究主要集中在以下三个方面:

(1) 雌雄异株植物的性别决定(sex determination)机制。近年来,在以番木瓜(Papaya)为模式植物,基于遗传学、基因组学和表观遗传学等手段在雌雄异株性别决定机制和性染色体的研究取得了丰硕成果(Aryal & Ming, 2014),如在番木瓜性染色体的测序(Wang et al, 2012),性染色体物理图谱的构建(Na et al, 2012);性染色体与常染色体以及 X 染色体与 Y 染色体的比较(Wang et al, 2012; Gschwend et al, 2012),小 RNA 的分布与性别特异表达(Aryal et al, 2014),性别特异性基因与重复序列的分析(Iovene et al, 2015; Na et al, 2014)等方面,

表 7 CNKI 数据库中雌雄异株研究引用频次前十位的论文

Table 7 List of top ten high cited articles on dioecious plant in CNKI database

排名 Rank	作者 Author	论文题目 Article title	引用频次 Cited time	作者机构 Organization	发表期刊名称 Journal	发表年度 Published year
1	张立平等 ZHANG LP et al.	雌雄异株葡萄的性别鉴定研究 The study on sexual distinction of dioecism in <i>Vitis</i>	68	浙江农业大学 Zhejiang Agricultural Univ	植物学通报 Chin Bullet Bot	1998
2	蔡永立和宋永昌 CAI YL & SONG YC	中国亚热带东部藤本植物的多样性 Diversity of vines in subtropical zone of East China	59	华东师范大学 East China Normal Univ	武汉植物学研究 J Wuhan Bot Res	2000
3	王丙武等 WANG BW et al.	杜仲雌雄株细胞学、顶芽及叶含胶量的比较 Comparison of cytology, apical buds and gutta content between staminate and pistillate of <i>Eucommia ulmoides</i> trees	55	北京大学 Peking Univ	植物学报 Acta Bot Sin	1999
4	姜正旺等 JIANG ZW et al.	猕猴桃属花粉形态及其系统学意义 Pollen morphology of <i>Actinidia</i> and its systematic significance	54	中科院武汉植物园 Wuhan Botanical Garden	植物分类学报 Acta Phytotax Sin	2004
5	李国梁等 LI GL et al.	杨梅雌雄株同工酶和酚类物质的鉴别 Study on the sex identification of <i>Myrica rubra</i> L.	49	浙江农业大学 Zhejiang Agriculture Univ	浙江农业大学学报 J Zhejiang Agr Univ	1995
6	高丽等 GAO L et al.	不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征 Effects of soil moisture levels on photosynthesis, transpiration, and moisture use efficiency of female and male plants of <i>Hippophae rhamnoides</i> spp. <i>sinensis</i>	47	内蒙古大学 Inner Mongolia Univ	生态学报 Acta Ecol Sin	2009
7	李庆军等 LI QJ et al.	山姜属植物花柱卷曲性传粉机制的研究 Study on the flexistylous pollination mechanism in <i>Alpinia</i> plants (Zingiberaceae)	44	中科院西双版纳热带植物园 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden	植物学报 Act Bot Sin	2001
8	吴鹏程等 WU PC et al.	中国与北美苔藓植物区系关系的探讨 Phytogeographical relationships of the bryophytes	40	中科院植物研究所 Institute of Botany	植物分类学报 Acta Phytotax Sin	2001
9	陈中海和陈晓静 CHEN ZH & CHEN XJ	雌雄异株果树的性别决定及性别鉴定的研究进展 Progress of study on sex determination and sex identification in dioecious fruit trees	39	福建农业大学 Fujian Agriculture and Forestry Univ	福建农业大学学报 J Fujian Agr For Univ	2000
10	赵云云和刘捷平 ZHAO YY & LIU JP	雌雄异株植物的生理生化特性及性别鉴定 Physiological and biochemical characteristics and identification of the sexes in dioecious plants	39	北京师范学院 Beijing Teachers' College	北京师范学院学报 (自然科学版) J Beijing Teachers College	1991

部分揭示了性别决定的分子机制。同时,也引发了在更大物种范围的性别决定机制研究热潮,如野生葡萄 (Picq et al, 2014), 酸模属植物 *Rumex hastatulus* (Hough et al, 2014)、野生草莓 (Govindarajulu et al, 2013) 等性别决定可能机制。Xiong et al (2013) 应用蛋白质组学方法,找到一些黄连木 (*Pistacia chinensis*) 苗期雌雄植株的差异表达蛋白,为雌雄异株的早期鉴定提供了可能。Kumar et al (2014) 对雌雄异株植物的三种染色体系统进行了详细综述。从表 8 所列排名前二十的突现文献中发现,性别决定相关文献占比超过 50%,且大部分突现度持续至今,表明在今后相当一段时间内,该领域仍是雌雄异株植物研究最重要的前沿和热点。

(2) 雌雄植株对环境因子的响应差异。中国学者在这方面的研究近年来异军突起。特别是以杨树为模式植物,围绕环境胁迫和气候变化因子展开了大量工作。如 Xu et al (2008a) 对青杨雌雄植株对干旱和气温增加的响应研究,认为雄性植株具有更高的耐受能力。Zhang et al (2011) 研究低温胁迫下青杨雌雄异株的响应差别,认为雄株比雌株具有更好的保护机制。Jiang et al (2012) 从转录水平研究滇杨雌雄植株在盐胁迫下的基因差异表达,认为雄性植株更耐盐胁迫,可能是由于包括光合作用相关基因在内的功能基因在雄株上表现为上调,而在雌株上下调有关。Chen et al (2010) 研究滇杨雌雄植株对干旱和盐复合胁迫的响应,认为雄株具有更强的

表 8 2002–2015 年间 Web of Science 数据库中雌雄异株研究高突现引文

Table 8 Top references with the strongest citation bursts on dioecious plant in Web of Science during 2002–2015

引文文献 References	突现强度 Strength	突现起始年限 Begin	突现结束年限 End
DONNISON IS, 1996. Isolation of Y chromosome-specific sequences from <i>Silene latifolia</i> and mapping of male sex-determining genes using representational difference analysis. <i>Genetics</i> , 144: 1893–1901	7.371 9	2002	2005
MATSUNAGA S, 1996. Isolation and developmental expression of male reproductive organ-specific genes in a dioecious campion, <i>Melandrium album</i> (<i>Silene latifolia</i>). <i>Plant J</i> , 10:679–689.	6.300 77	2002	2004
LLOYD DG, 1982. Selection of combined versus separate sexes in seed plants. <i>Am Nat</i> , 120:571	5.216 3	2002	2003
MATSUNAGA S, 2001. Sex determination by sex chromosomes in dioecious plants. <i>Plant Biol</i> , 3:481–488.	5.711 7	2003	2004
SPIGLER RB, 2008. Genetic mapping of sex determination in a wild strawberry, <i>Fragaria virginiana</i> , reveals earliest form of sex chromosome. <i>Heredity</i> , 101:507–517.	6.976 6	2010	2015
OBESO JR, 2002. The costs of reproduction in plants. <i>New phytol</i> , 155:321–348.	6.366 5	2010	2012
MARTIN A, 2009. A transposon-induced epigenetic change leads to sex determination in melon. <i>Nature</i> , 461:1135–1138.	6.1024	2010	2015
XU X, 2008. Sex-specific responses of <i>Populus cathayana</i> to drought and elevated temperatures. <i>Plant Cell Environ</i> , 31:850–860.	5.621 5	2010	2015
HARRIS MS, 2008. Roots, shoots and reproduction: sexual dimorphism in size and costs of reproductive allocation in an annual herb. <i>P R Socb</i> , 275:2595–2602.	6.404 3	2011	2015
BARRETT SCH, 2010. Ecological genetics of sex ratios in plant populations. <i>Philos T R Socb</i> , 365:2549–2557.	8.137 1	2012	2015
CHIBALINA MV, 2011. Plant Ychromosome degeneration is retarded by haploid purifying selection. <i>Curr Biol</i> , 21:1475–1479.	7.326 3	2012	2015
BARRETT SCH, 2010. Understanding plant reproductive diversity. <i>Philos T R Socb</i> , 365:99–109.	6.509 6	2012	2015
CHEN LH, 2010. Sex-related adaptive responses to interaction of drought and salinity in <i>Populus yunnanensis</i> . <i>Plant Cell Environ</i> , 33:1767–1767.	6.156 5	2012	2015
CORNELISSEN T, 2005. Sex-biased herbivory: a meta-analysis of the effects of gender on plant-herbivore interactions. <i>OIKOS</i> :111:488	5.99	2012	2015
MING R, 2011. Sex Chromosomes in Land Plants. <i>Ann Rev Plant Biol</i> , 62:485–514	13.763 6	2013	2015
WANG JP, 2012. Sequencing papaya X and Y ^h chromosomes reveals molecular basis of incipient sex chromosome evolution. <i>P Natl Acad Sci USA</i> .109: 1370–13715.	9.392 7	2013	2015
BERGERO R, 2011. Preservation of the Y transcriptome in a 10-Million-Year-Old plant sex chromosome system. <i>Curr Biol</i> , 21:1470–1474.	8.302 8	2013	2015
CHARLESWORTH D, 2013. Plant sex chromosome evolution. <i>J Exp Bot</i> , 64:405–420.	7.328 4	2013	2015
SINCLAIR JP, 2012. Biased sex ratios in plants: Theory and trends. <i>Bot Rev</i> , 78:63–86.	6.869	2013	2015
DIGGLER PK, 2011. Multiple developmental processes underlie sex differentiation in angiosperms. <i>Trends Genet</i> , 27:368–376.	6.568 5	2013	2015

抗性。在毛白杨对盐胁迫的研究中也发现,盐胁迫对毛白杨雌株生长以及光合的负面影响更大,雌株叶片和茎中的 Na^+ 和 Cl^- 积累量更高;而毛白杨雄株限制了根部 Na^+ 向茎的转运,表现出对盐胁迫更强的抵抗力(Lu et al, 2014)。无论是在氮亏缺还是磷亏缺下,青杨雄株有较雌株更高的光合速率和养分利用效率(Zhang et al, 2014);而在欧洲山杨(*Populus tremula*)的研究中发现,在氮磷亏缺胁迫下酚类物质含量雌雄间无显著差异,但雌株比雄株有更高的氮含量,且雌株在矿质元素获取,类黄酮及缩合单宁的生成方面更具优势(Tendry et al, 2014)。

此外, Li et al (2004) 研究沙棘雌雄个体对水分胁迫的响应,认为雄株比雌株有更保守的水分利用策略。Xu et al (2008b) 对青杨的研究也认为雄株更耐旱。盐胁迫下银杏(*Ginkgo biloba*)雌株有更高的光合速率、内在水分利用效率和抗氧化酶活性,却有较低的蒸腾速率以减少水分散失(蒋雪梅等, 2009)。雌性个体将更多的资源投给菌根以获取大量土壤营养支持繁殖(Vega-Frutis et al, 2013)。Dawson et al (2004) 对桉叶桉研究表明,无论在野外还是受控环境条件下,雌雄植株在干旱胁迫下表现出生理特性上的显著差异; Juvany et al (2014) 对乳香黄连木

WOS
Database
Citation
Index
Expanded
Version
2015

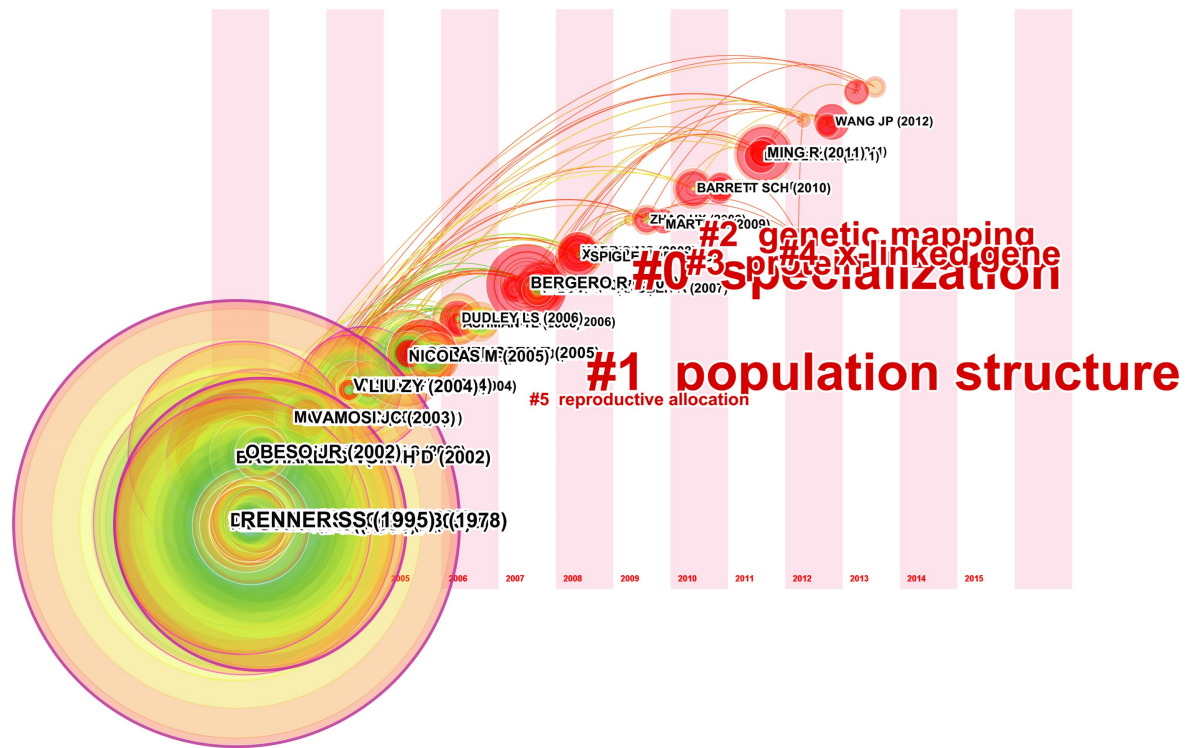


图 3 WOS 数据库中雌雄异株文献共引网络图谱

Fig. 3 Co-citation network map on documents of dioecious plant in WOS database

(*Pistacia lentiscus*) 在光保护方面亦存在性别差异;然而, Yang et al (2014) 对草本植物中华山蓼 (*Oxyria sinensis*) 对干旱的响应在生理上并无明显差异。近年来的研究揭示了雌雄植株在逆境胁迫下的形态和生理可塑性响应是自身生物学特性与环境共同作用的体现,不同植物的雌雄植株对干旱、养分、盐碱胁迫等逆境因子的性别响应差异,结果可能因物种而异。

(3) 雌雄植株的繁殖代价与防御策略差异。雌雄异株植物中,木本植物中雄株比雌株个体大,而草本植物中刚好相反。在草本植物山黧 (*Mercurialis annua*) 研究中发现雌雄植株表现出不同的繁殖分配策略,雄株比雌株开花早,繁殖分配多,将更多的资源分配到根部以获取更多的氮资源用于花粉发育,而雌株则将更多的资源分配到光合器官,从而储藏更多的碳利于产生更多的种子 (Harris & Pannell, 2008)。由于繁殖功能的差异,雌雄植株间表现出不同的生长和生殖分配方式。不同时间表现出不同的资源分配模式 (Sánchez-Vilas et al, 2012)。草本

植物 *Rumex hastatulus* 营养生长阶段,雌性个体大小并无差异,开花时期,雄性个体显著高于雌性个体,种子成熟期,则出现雌性个体显著高于雄性个体的现象,这种雌雄植株在生长过程中出现的高度二态性变化有利于传粉和种子散播,从而优化了不同性别的繁殖功能 (Pickup & Barrett, 2012)。土壤肥沃时,雄性植株分配更多的资源到生殖器官,而在土壤贫瘠时,雄株分配到生殖的资源锐减,但雌株却呈增加的趋势 (Hesse & Pannell, 2011)。通过对 54 篇雌雄异株相关文献的 meta-分析发现,雄性植株更易被植食性动物取食,雄株叶子更多,更大,花更少,茎通常更长;具有较低的次生产物和防御能力,但雌雄植株之间氮等养分含量差异不大 (Cornelissen, 2005)。然而对 *Spondias purpurea* 的研究却发现雌株更容易被取食,其营养更多,防御分配则更少 (Maldonado-López et al, 2014)。然而 Robinson et al (2014) 从植物形态和动植物关系方面比较分析了欧洲山杨雌雄个体,认为无论营养生长还是生殖生长阶段,其资源分配并无显著差异。Randriamanana et al (2014) 对

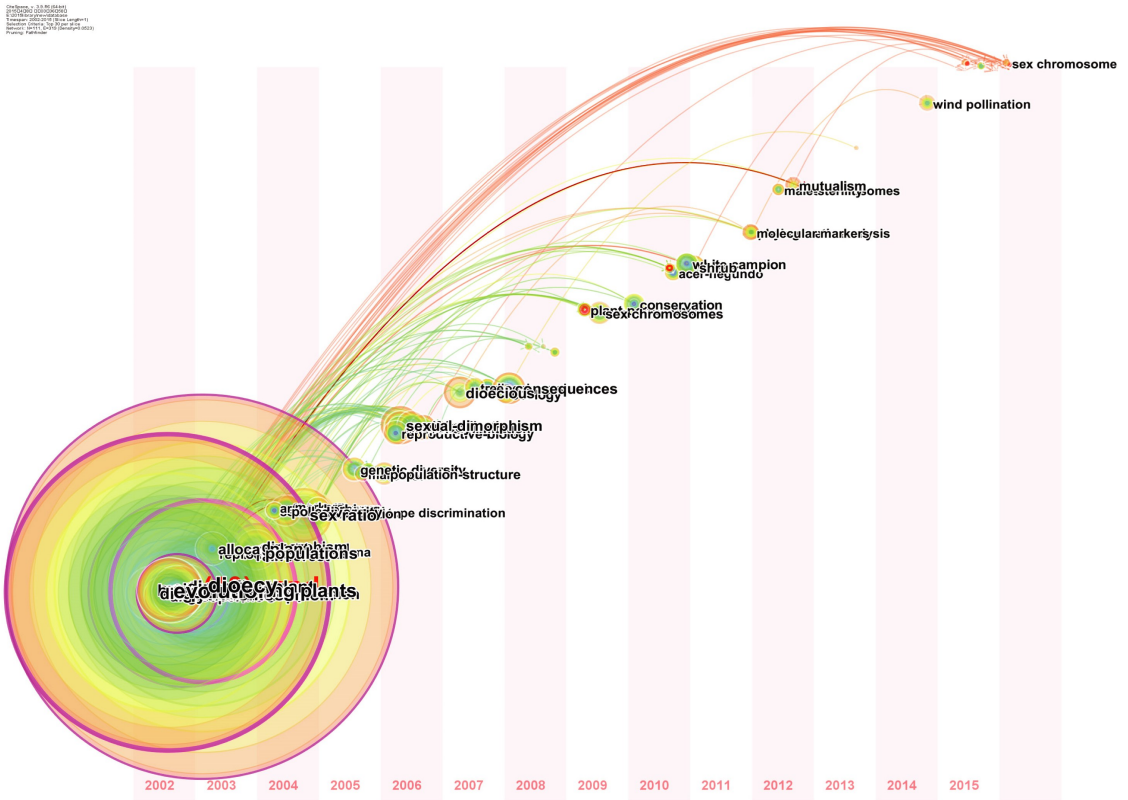


图 4 中国学者发表在 WOS 数据库中雌雄异株文献的高频热点词知识图谱
 Fig. 4 Knowledge map of high-frequency keywords in dioecious plant published in WOS database

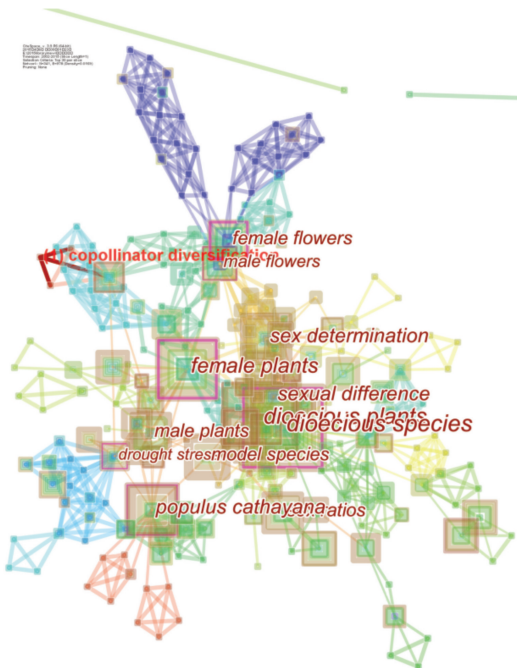


图 5 中国学者发表在 WOS 数据库中雌雄异株文献的高频主题词知识图谱
 Fig. 5 Knowledge map of high-frequency terms in dioecious plant published in WOS database by Chinese authors

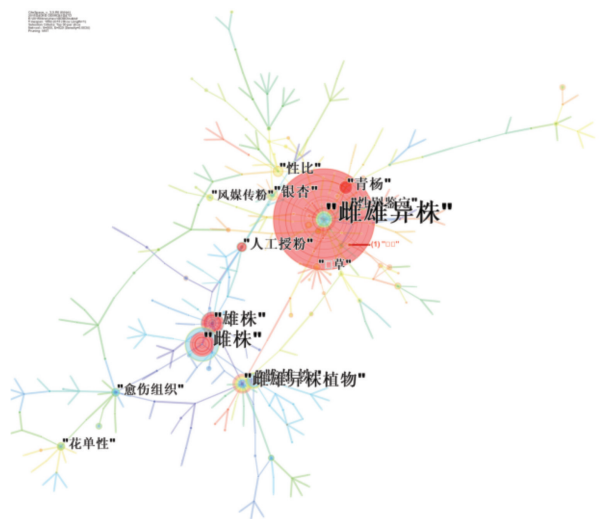


图 6 CNKI 核心期刊数据库中雌雄异株文献的高频词热点词知识图谱
 Fig. 6 Knowledge map of keywords in dioecious plant published in CNKI core database

欧洲山杨的研究则认为雌雄植株的繁殖分配并无显著差别。在对野外自然种群的调查中发现,高海

拔,高纬度和干旱条件下通常具有更高的雄株比例((Pickup & Barrett, 2012; Field et al, 2013)。在高密度种群中有高的雌株比例,低密度种群性比则接近 1(Pickup & Barrett, 2013)。

3 结论

根据 Web of Science 数据库所检索的资料来看,雌雄异株相关研究呈现逐渐上升的趋势,特别是近二十年来呈现快速增长的势头,表明各国科学工作者对雌雄异株相关研究充满浓厚的兴趣。从 CNKI 数据来看,尽管我国从 1950 年就有雌雄异株植物的相关报道,但自 1980 年后的三十多年间,发文数量呈现波动状态,增幅较小,表明我国雌雄异株相关领域重视程度不够,但可喜的是自 2002 年以后,我国学者在国际 SCI 刊物上发表的相关论文呈迅速增长态势,也从侧面反映出我国学者更加重视国际交流,更愿意把高水平的研究成果发表到国际性刊物上,这同时也带动了相关研究在国内期刊的发表。就研究内容而言,早期的研究在雌雄异株植物的进化(Bawa, 1980)、种群结构与动态(Bierzychudek & Eckhart, 1988)、生长、空间分布(Decker & Pilson, 2000; Bertiller et al, 2002)、繁殖代价(Obeso, 2002; Nanami et al, 2004)方面研究比较多,近年来,雌雄异株领域的研究主要集中在以番木瓜为模式植物,从分子水平研究雌雄异株的性别分化和性别决定机制;基于全球气候变化和环境胁迫的雌雄性别响应差异(Munné-Bosch, 2015);以及雌雄植株繁殖分配与防御策略等方面。

参考文献:

ARYAL R, JAGADEESWARAN G, ZHENG Y, et al, 2014. Sex specific expression and distribution of small RNAs in papaya [J]. *BMC Genomics*, 15: 20–29.

ARYAL R, MING R, 2014. Sex determination in flowering plants: papaya as a model system [J]. *Plant Sci*, 217–218:56–62.

BAWA KS, 1980. Evolution of dioecy in flowering plants [J]. *Ann Rev Ecol Syst*, 11:15–39.

BERTILLER MB, SAIN CL, BISIGATO AJ, et al, 2002. Spatial sex segregation in the dioecious grass *Poa ligularis* in northern Patagonia: the role of environmental patchiness [J]. *Biodivers Conserv*, 11: 69–84.

BIERZYCHUDEK P, ECKHART V, 1988. Spatial segregation of the sexes of dioecious plants [J]. *Am Nat*, 132:32–43.

CHEN J, LI CY, 2014. Sex-specific responses to environmental stresses and sexual competition of dioecious plants [J]. *Chin J App Environ Biol*, 20(4): 743–750. [陈娟, 李春阳, 2014. 环

境胁迫下雌雄异株植物的性别响应差异及竞争关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 20(4): 743–750.]

CHEN L, ZHANG S, ZHAO H, et al, 2010. Sex-related adaptive responses to interaction of drought and salinity in *Populus yunnanensis* [J]. *Plant Cell Environ*, 33(10): 1767–1778.

CHEN CM, 2006. Cite Space II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *J Am Soc Infr Sci Technol*, (03): 359–377.

CORNELISSEN T, 2005. Sex-biased herbivory: a meta-analysis of the effects of gender on plant-herbivore interactions [J]. *Oikos*, 111: 488–500.

DAWSON TE, EHLERINGER JR, 1993. Gender-specific physiology, carbon isotope discrimination, and habitat distribution in Boxelder (*Acer negundo*) [J]. *Ecology*, 74:798–815.

DAWSONTE, WARD JK, EHLERINGER JR, 2004. Temporal scaling of physiological responses from gas exchange to tree rings: a gender-specific study of *Acer negundo* (Boxelder) growing under different conditions [J]. *Funct Ecol*, 18: 212–222.

DECKER KL, PILSON D, 2000. Biased sex ratios in the dioecious annual *Croton texensis* (Euphorbiaceae) are not due to environmental sex determination [J]. *Am J Bot*, 87:221–229.

DING XD, 1992. Literature metrology basis [M]. Beijing: Peking University Press: 204–209, 220–232. [丁学东. 1992. 文献计量学基础 [M]. 北京: 北京大学出版社: 204–209, 220–232.]

FIELD DL, PICKUP M, BARRETT SC, 2013. Ecological context and metapopulation dynamics affect sex-ratio variation among dioecious plant populations [J]. *Ann Bot*, 111(5): 917–23.

GOVINDARAJULU R, LISTON A, ASHMAN TL, 2013. Sex-determining chromosomes and sexual dimorphism: insights from genetic mapping of sex expression in a natural hybrid *Fragaria × ananassa* subsp. *cuneifolia* [J]. *Heredity*, 110(5): 430–438.

GSCHWEND AR, YU Q, TONG EJ, et al, 2012. Rapid divergence and expansion of the X chromosome in papaya [J]. *Proc Natl Acad Sci, USA*, 109(34): 13716–13721.

HARRIS MS, PANNELL JR, 2008. Roots, shoots and reproduction: sexual dimorphism in size and costs of reproductive allocation in an annual herb [J]. *Proc Biol Sci*, 275: 2595–2602.

HESSE E, PANNELL JR, 2011. Sexual dimorphism in a dioecious population of the wind-pollinated herb *Mercurialis annua*: the interactive effects of resource availability and competition [J]. *Ann Bot*, 107(6): 1039–1045.

HOUGH J, HOLLISTER JD, WANG W, et al, 2014. Genetic degeneration of old and young Y chromosomes in the flowering plant *Rumex hastatulus* [J]. *Proc Natl Acad Sci, USA*, 111(21): 7713–7718.

IOVENE M, YU Q, MING R, et al, 2015. Evidence for emergence of sex-determining gene(s) in a centromeric region in *Vasconcellea parviflora* [J]. *Genetics*, 199(2): 413–421.

JIANG H, PENG S, ZHANG S, et al, 2012. Transcriptional profiling analysis in *Populus yunnanensis* provides insights into molecular mechanisms of sexual differences in salinity tolerance [J]. *J Exp Bot*, 63(10): 3709–3726.

JIANG XM, HU JY, QI WH, et al, 2009. Different physiological responses of male and female *Ginkgo biloba* (Ginkgoaceae) seedlings to salt stress [J]. *Acta Bot Yunnan*, 31(5): 447–453. [蒋雪梅, 胡进耀, 戚文华等, 2009. 银杏幼苗雌雄株对盐胁迫响应的差别 [J]. *云南植物研究*, 31(5): 447–453.]

- JUVANY M, MÜLLER M, PINTÓ-MARIJUAN M, et al, 2014. Sex-related differences in lipid peroxidation and photoprotection in *Pistacia lentiscus*[J]. J Exp Bot, 65(4):1039–1049.
- KUMAR S, KUMARI R, SHARMA V, 2014. Genetics of dioecy and causal sex chromosomes in plants [J]. J Genet, 93(1):241–277.
- LI CY, REN J, LUO JX, et al, 2004. Sex-specific physiological and growth responses to water stress in *Hippophae rhamnoides* L populations [J]. Acta Physiol Plant, 26: 123–129.
- LU YW, WANG GQ, MENG QJ et al, 2014. Growth and physiological responses to arbuscular mycorrhizal fungi and salt stress in dioecious plant *Populus tomentosa* [J]. Can J For Res, 44: 1020–1031.
- MALDONADO-LÓPEZ Y, CUEVAS-REYES P, SÁNCHEZ-MONTOYA G, et al, 2014. Growth, plant quality and leaf damage patterns in a dioecious tree species: is gender important? [J] Arthropod-Plant Inter, 8(4): 241–251.
- MATALLANA G, WENDT T, ARAUJO DSD, et al, 2005. High abundance of dioecious plants in a tropical coastal vegetation [J]. Am J Bot, 92: 1513–1519.
- MUNNÉ-BOSCH S, 2015. Sex ratios in dioecious plants in the framework of global change [J]. Environ Exp Bot, 109:99–102.
- NA JK, WANG J, MURRAY JE, et al, 2012. Construction of physical maps for the sex-specific regions of papaya sex chromosomes [J]. BMC Genom, 13:176–186.
- NA JK, WANG J, MING R, 2014. Accumulation of interspersed and sex-specific repeats in the non-recombining region of papaya sex chromosomes [J]. BMC Genom, 15(1): 335–347.
- NANAMI S, KAWAGUCHI H, YAMAKURA T, 2004. Sex change towards female in dying *Acer rufinerve* trees [J]. Ann Bot, 93: 733–740.
- OBESO JR, 2002. The costs of reproduction in plants [J]. New Phytol, 155:321–348.
- PICKUP M, BARRETT SC, 2012. Reversal of height dimorphism promotes pollen and seed dispersal in a wind-pollinated dioecious plant [J]. Biol Lett, 8(2):245–248.
- PICKUP M, BARRETT SC, 2013. The influence of demography and local mating environment on sex ratios in a wind-pollinated dioecious plant [J]. Ecol Evol, 3(3):629–639.
- PICQ S, SANTONI S, LACOMBE T, et al, 2014. A small XY chromosomal region explains sex determination in wild dioecious *V. vinifera* and the reversal to hermaphroditism in domesticated grapevines[J]. BMC Plant Biol, 14: 229–246.
- RANDRIAMANANA TR, NYBAKKEN L, LAVOLA A, et al, 2014. Sex-related differences in growth and carbon allocation to defence in *Populus tremula* as explained by current plant defence theories[J]. Tree Physiol, 34(5):471–87.
- RENNER SS, RICKLEFS RE, 1995. Dioecy and its correlates in the flowering plants [J]. Am J Bot, 82: 596–606.
- ROBINSON KM, DELHOMME N, MÄHLER N, et al, 2014. *Populus tremula* (European aspen) shows no evidence of sexual dimorphism[J]. BMC Plant Biol, 14:276–239.
- SÁNCHEZ-VILAS J, BERMÚDEZ R, RETUERTO R, 2012. Soil water content and patterns of allocation to below- and above-ground biomass in the sexes of the subdioecious plant *Honckenya peploides*[J]. Ann Bot, 110(4):839–8348.
- TENDRY RR, LINE N, ANU L, et al, 2014. Sex-related differences in growth and carbon allocation to defence in *Populus tremula* as explained by current plant defence theories [J]. Tree Physiol, 34(5):471–487.
- VEGA-FRUTIS R, VARGA S, KYTÖVIITA MM, 2013. Dioecious species and arbuscular mycorrhizal symbioses; the case of *Antennaria dioica*[J]. Plant Sig Behav, 8(3):23445.
- WANG J, NA JK, YU Q, et al, 2012. Sequencing papaya X and Y^h chromosomes reveals molecular basis of incipient sex chromosome evolution [J]. Proc Natl Acad Sci, USA, 109(34):13710–13715.
- XIONG E, WU X, SHI J, et al, 2013. Proteomic identification of differentially expressed proteins between male and female plants in *Pistacia chinensis* [J]. PLoS ONE, 8(5):64276–64284.
- XU X, YANG F, XIAO X, et al, 2008a. Sex-specific responses of *Populus cathayana* to drought and elevated temperatures [J]. Plant Cell Environ, 31:850–860.
- XU X, PENG GQ, WU CC, et al, 2008b. Drought stress inhibits more photosynthetic capacity in females than males of dioecious plant *Populus cathayana* [J]. Tree Physiol, 28(11): 1751–1759.
- YANG J, HU L, WANG Z, et al, 2014. Responses to drought stress among sex morphs of *Oxyria sinensis* (Polygonaceae), a subdioecious perennial herb native to the East Himalayas [J]. Ecol Evol, 4(21):4033–4040.
- ZHANG S, JIANG H, ZHAO H, et al, 2014. Sexually different physiological responses of *Populus cathayana* to nitrogen and phosphorus deficiencies [J]. Tree Physiol, 34(4): 343–354.
- ZHANG S, JIANG H, PENG S, et al, 2011. Sex-related differences in morphological, physiological, and ultrastructural responses of *Populus cathayana* to chilling [J]. J Exp Bot, 62(2):675–686.