

基于 CiteSpace 的树木水分利用效率研究及发展趋势的可视化分析

孙守家^{1,2,3,4*} 孙 翠⁵ 胡晓创^{1,2,3,4}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林草局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 3. 河南小浪底森林生态系统国家野外科学观测研究站, 河南济源 454650; 4. 北京城市生态系统(门头沟)定位观测研究站, 北京 100091; 5. 平度市自然资源局, 山东平度 266700)

摘要: 近年来, 植物水分利用效率成为国内外生理生态研究的热点。为确定树木水分利用效率研究热点演化和发展方向, 应用 CiteSpace 可视化软件对 1984—2024 年中国知网(CNKI)、中国学术期刊数据库(万方数据)和维普中文科技期刊数据库(VIP)和 Web of Science 数据库中 6 461 篇论文进行分析, 对中文和英文论文的研究差异进行比较。结果显示: 近 40 年来相关研究发展迅速, 中文和英文论文大部分关键词一致, 出现次数最高的均为水分利用效率。中文论文更专注树木的生理变化, 光合速率、蒸腾速率、气孔导度排序靠前, 英文论文则更聚焦对环境的影响以及新研究方法的应用。在关键词共现性和聚类上, 中文论文关注短期光合和蒸腾等生理变化更多, 而英文论文更聚焦气候变化和树木长期生理变化, 国内外论文对于水分利用效率研究形成了不同的研究类群; 在演化过程中, 中文论文的研究重点始终围绕水分利用效率和光合作用, 而英文论文则持续关注果实品质、稳定同位素、气候变化以及树木年轮等方面的研究; 在研究热点上, 中文论文关键词中的干旱胁迫、光合特性等现阶段热度较高, 英文论文中的土壤水分和功能性状热度较高, 表明这些热点具有广阔研究前景。研究结果为全面了解国内外树木水分利用效率研究现状和发展趋势提供参考, 同时也为后续使用水分利用效率指标评估树木健康研究提供借鉴。

关键词: 树木; 水分利用效率; 水碳平衡; 可视化; 热点分析

中图分类号: S761.1 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2025)01-0021-08

Visualization analysis of research and development trends in tree water use efficiency based on CiteSpace

SUN Shoujia^{1,2,3,4*} SUN Cui⁵ HU Xiaochuang^{1,2,3,4}

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Henan Xiaolangdi Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Jiyuan 454650, China; 4. Beijing Urban Ecosystem (Mentougou) Observation and Research Station, Beijing 100091, China; 5. Pingdu Natural Resources Bureau, Pingdu 266700, China)

Abstract: In recent years, the plant water use efficiency has emerged as a prominent topic in both physiological and ecological research, gaining attention both domestically and internationally. This study used CiteSpace software to analyze 6 461 papers from three major Chinese journals and the Web of Science database, spanning from 1984 to 2024. The aim was to explore the differences in research focus between Chinese and international papers and to identify the evolution and future directions of research hotspots related to tree water use efficiency. The findings reveal that over the past 40 years, research in this area has advanced rapidly. Most of the keywords in both Chinese and international papers are consistent, with “water use efficiency” being the most frequently mentioned term. Chinese papers tend to concentrate more on the physiological changes in trees, with keywords like photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance ranking higher. In contrast, international papers place greater emphasis on environmental impacts and the application of new research methods. In terms of keyword co-occurrence and

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-01-04。

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171871); 北京市自然科学基金项目(6242035)。

* 通信作者: 孙守家(E-mail: ssj1011@163.com), 研究员。

clustering, Chinese papers are more focused on short-term physiological changes such as photosynthesis and transpiration. Meanwhile, international papers are more concerned with climate change and the long-term physiological changes in trees. This has led to the formation of distinct research groups on water use efficiency in both domestic and international contexts. Throughout the evolution of this research field, studies on water use efficiency and photosynthesis have been a consistent theme in Chinese journals. In contrast, international papers have continued to explore topics such as fruit quality, stable isotopes, climate change, and tree rings up to 2024. Regarding current research hotspots, keywords like drought stress and photosynthetic characteristics are particularly popular in Chinese papers. On the other hand, soil moisture and functional traits are highly prevalent in international papers, suggesting these areas hold significant research potential. This study provides a comprehensive overview of the current research status and development trends in tree water use efficiency, offering valuable insights for both domestic and international research communities. Additionally, it offers a reference for future research focused on using water use efficiency to evaluate tree health.

Key words: trees; water use efficiency; water-carbon balance; visualization; hotspot analysis

树木通过气孔吸收 CO₂ 进行光合作用,同时通过气孔蒸腾散失水分从而降低叶温,在水分消耗与碳吸收之间保持微妙的平衡以应对环境条件变化。水分利用效率是指消耗单位的水所同化碳的数量,它将水与碳耦合在一起,反映出植物光合过程中获取的碳与消耗的水之间的关系(胡中民等, 2009)。对树木水分利用效率的深入研究,不仅有助于揭示树木的生存策略,还能优化有限水资源的利用,从而实现最大化的产量与经济效益(刘超等, 2018)。因此,该领域已成为近年来国内外生理生态研究的热点(Di Matteo et al., 2017)。

早在 20 世纪初,Briggs 和 Shantz 等使用“需水量”一词用以表示作物生产单位地上部分干物质量所需的水量(严昌荣等, 2001)。随后,蒸腾比率、蒸腾生产率、蒸腾效率、耗水量等名词的提出,进一步推动了植物水分利用效率概念的发展(付爱红等, 2014)。在空间尺度上,通常将植物水分利用效率划分为细胞(胡化广等, 2013)、叶片(田金园等, 2022)、单株(Sun et al., 2022)、生态系统等水平(黄健强等, 2020, 张玮等, 2011)。在时间尺度上,通常分为瞬时水分利用效率、潜在水分利用效率(Zhou et al., 2016)和长期水分利用效率(Simon et al., 2020)等。一般来说,水分利用效率可揭示内在耗水机制,反映植物对环境的适应性(Liu et al., 2018),是评价植物水分利用与耐旱特性的重要指标之一。

近年来,稳定同位素(Sun et al., 2022; 田金园等, 2022)、涡度(黄健强等, 2020)及遥感(刘潇忆等, 2023)等新兴技术的发展与运用,使得水分利用效率在生态系统尺度和区域尺度的研究热度持续上升,众多学者对植物水分利用效率的测定方法、提高途径以及对气候变化的响应等方面进行研究(刘超等, 2018);也发现当树木遭受干旱(Pellizzari et al., 2016; Sun et al.,

2018)、病害(Baharim et al., 2024)、昆虫袭击(Sangüesa-Barreda et al., 2015; Camarero et al., 2019)时出现衰退甚至死亡,水分利用效率会发生不同变化,使用真菌或菌根(Birhane et al., 2012; Tang et al., 2022)则会提高植物生长和改变水分利用效率。随着对水分利用效率研究热度持续上升,论文发表的数量呈现显著增长趋势。然而,目前仍缺乏针对水分利用效率的系统梳理、总结及可视化分析等相关研究。

为了解国内外水分利用效率的研究热点和现状,本研究通过查阅中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)、中国学术期刊数据库(万方数据)、维普中文科技期刊数据库(Databases of Chinese Scientific and Technical Periodicals, VIP)和 Web of Science(WOS)数据库主题包含“水分利用效率”的 1984—2024 年的相关文献,使用 CiteSpace 软件可视化分析方法,系统梳理了水分利用效率论文数量、发文时间和关键词共现情况,并对中文期刊和英文期刊论文关注的研究热点差异进行比对分析,挖掘该研究领域的知识结构、演化过程和未来发展方向,旨在为后续水分利用效率研究提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 数据来源与检索

中文期刊数据来自于 CNKI、万方数据和 VIP,检索时间范围为 1984 年 1 月—2024 年 10 月,文献类型选择期刊论文、学位论文和会议论文,数据库检索方式为在主题中包含“水分利用效率”,同时在摘要中须包含“树木”,将研究对象精确定位到树木;英文期刊来自于 WOS 数据库和 VIP,检索时间与中文期刊一致,数据库检索方式为 subject=“water use efficiency”和 abstract=“tree”,检索论文以 NoteExpress

格式导出,在NoteExpress4.1中去掉重复论文,获得中文论文和英文论文分别为1219篇和5242篇。

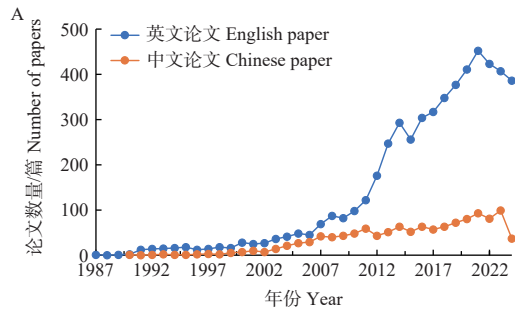
1.2 统计分析

在NoteExpress将获得的论文以“Refworks”格式导出,保存为“download.txt”格式并放入input文件夹中,在CiteSpace 6.3.R1软件设置Time Slicing(时间跨度)为1994—2024,Year's Per Slice(时间切片)为1a,Node type中选择Keyword(关键词),在Selection Criteria(选择标准)面板中选择g-index(G指数),根据不同的节点类型调整k值后,在Pruning面板中勾选“Pathfinder”“Pruning sliced networks”和“Pruning the merged network”等选项,对关键词进行共现、聚类 and 突现词分析,绘制关键词共现图、聚类图、时间线及突现图。

2 结果与分析

2.1 发文时间分布及差异

中文和英文论文的发文量有较大差距(图1)。英文论文累计5242篇,是中文论文的4.3倍,英文论文最早从1987年开始发表,并在2021年达到高峰,



该年发文量为452篇,随后下降;而中文论文从1990年开始发表,到2023年到达高峰为99篇。从年发文所占比例看,二者差异相差较小,最高比例在8.0%左右,但中文论文从2003年开始快速上升,早于英文论文的上升期2011年。

2.2 关键词频率的差异

根据关键词出现的频率,选取了频率最高的前10个关键词进行对比(图2)。中文和英文论文有7个关键词是一致的,出现频率最高的均为“水分利用效率”,表明中文和英文论文对于树木水分利用效率方面的研究关注点基本相同。从内容上看,中文论文更专注树木的生理变化,光合速率、蒸腾速率、气孔导度排序靠前;英文论文则更关注对环境的影响以及新研究方法的应用,干旱和稳定碳同位素排序靠前,排在第二位和第四位。同时,英文论文更关注生长和产量指标,中文论文则关注耗水量指标。

2.3 关键词共现性和聚类分析

共现图谱对关键词按频数统计,频数越高的关键词节点越大(图3)。中文论文共出现200个关键词和257条连线;英文论文共出现289个关键词

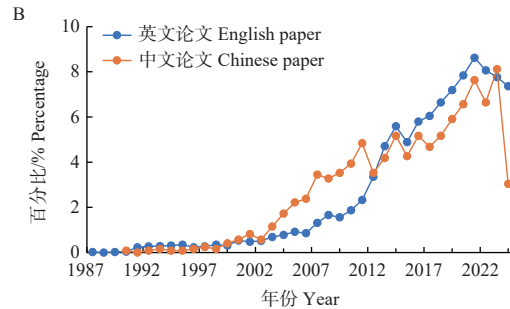


图1 1987—2024年中文和英文论文发文量和百分比的差异

Fig. 1 Differences in volume and annual percentage between Chinese and English papers from 1987 to 2024

注:A. 发文量;B. 年百分比。

Notes: A. Volume; B. Annual percentage.

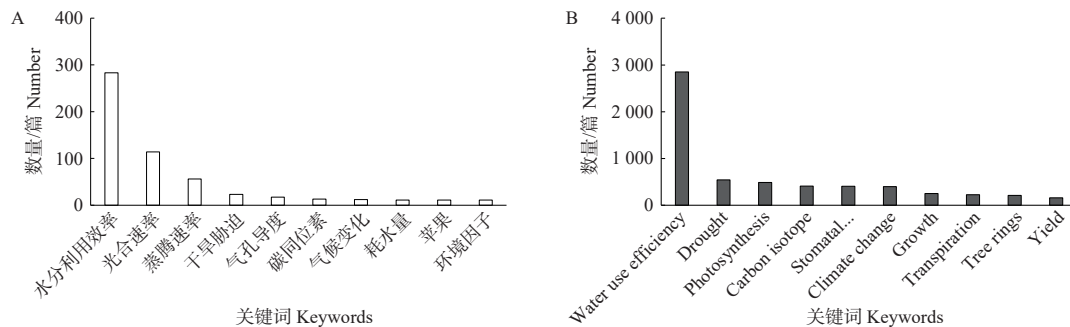


图2 论文中关键词出现的数量

Fig. 2 The number of keywords in papers

注:A. 中文论文;B. 英文论文。

Notes: A. Chinese paper; B. English paper.

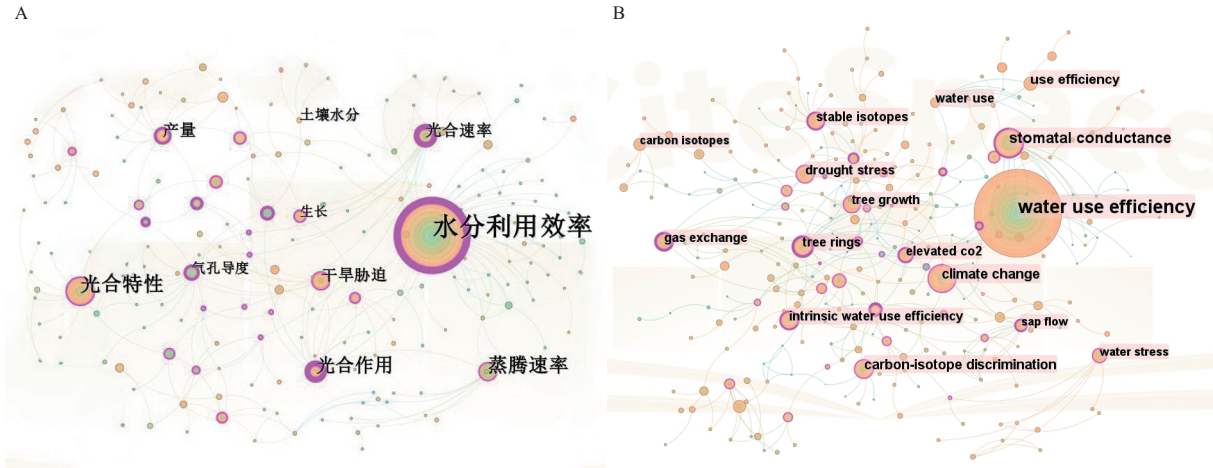


图3 论文关键词的共现网络
Fig. 3 The network of keywords in papers

注: A. 中文论文; B. 英文论文。

Notes: A. Chinese paper; B. English paper.

和 367 条连线。根据普莱斯定律将频数大于等于 20 的关键词分别定为高频关键词。中文论文最大的节点是水分利用效率(705 次), 第二类是与光合有关的关键词, 包括光合特性(142 次)、光合作用(101 次)和光合速率(58 次); 第三类是与蒸腾有关的关键词, 包括蒸腾速率(110 次), 国外论文最大节点为 Water use efficiency(3 230)次, 第二类是与蒸腾有关的关键词 stomatal conductance(583 次), 第三类是与气候变化有关的关键词 climate change(389)次、carbon isotope(301 次)和 tree rings(230 次)(图 3A)。二者的差异表明, 中文论文关注短期光合和蒸腾等生理变化多

一些, 而英文论文还关注气候变化和树木长期生理变化。

使用关键词进行聚类分析, 生成聚类图谱(图 4)。中文论文形成 17 个有意义的聚类, S 值=0.94>0.7, Q 值=0.79>0.3; 英文论文形成 22 个有意义的聚类, S 值=0.95>0.7, Q 值=0.84>0.3。表明本领域关键词聚类水平到达显著水平。在前 5 个类群, 中文论文是水分利用效率、土壤水分、油松、光合作用和产量, 英文论文是果实品质、CO₂ 浓度升高、气体交换、稳定同位素和耐旱性。由此可见, 国内外论文对于水分利用效率的研究形成了不同的研究类群。

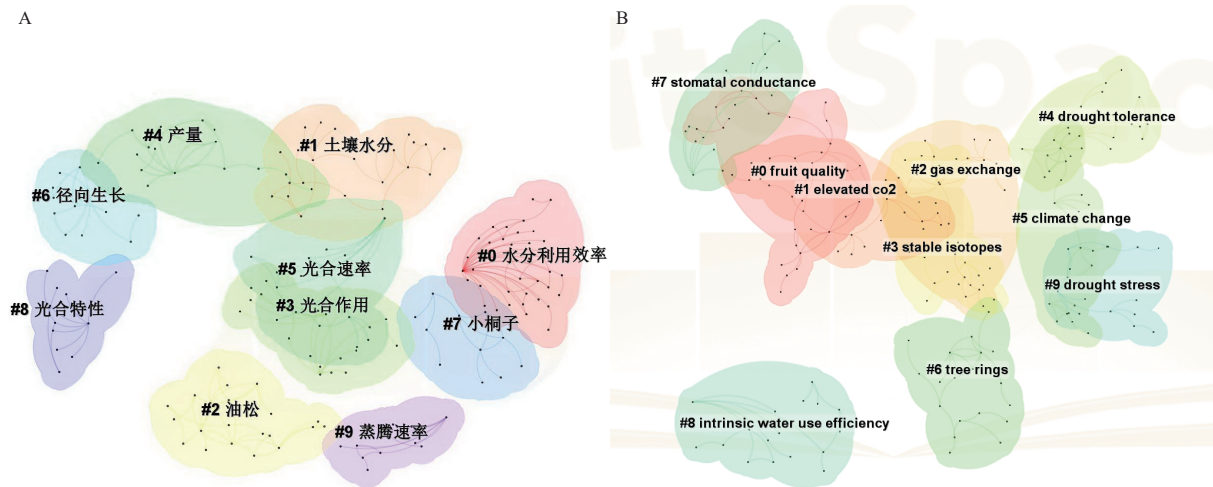


图4 论文关键词聚类图谱
Fig. 4 Keyword clustering map of papers

注: A. 中文论文; B. 英文论文。

Notes: A. Chinese paper; B. English paper.

2.4 关键词时间线和突显性分析

时间线能可视化研究热点随时间演变的过程。在中文论文中,水分利用效率和光合作用研究贯穿始终,油松 *Pinus tabulaeformis* Carrière 和小桐子 *Jatropha curcas* L.的径向生长和蒸腾速率等研究结束较早,土壤水分、产量、光合速率和光合特性等研究出现较晚,结束也较晚(图 5)。在英文论文中,fruit quality、stable isotope、climate change 和 tree rings 研究论文发表一直持续到 2024 年,而 stomatal conductance 研究结束较早,intrinsic water use efficiency 研究出现较晚但一直在持续(图 6)。多数聚类研究热度均在持续,表明该领域的相关研究平稳进行。

关键词突现反映出研究领域内研究热点的变化及趋势。中文论文关键词热度较高的分别是蒸腾速率、气孔导度和干旱胁迫等,热度持续时间较长的分别是蒸腾速率、水势和干旱胁迫,但前二者热度结束较早,干旱胁迫、光合特性等热度一直在持续(图 7A);在英文论文中,photosynthetic gas-exchange, atmospheric carbon-dioxide 和 water use 的热点强度较高,这三者与 carbon isotope, hydraulic conductance 的研究热度持续时间较长但结束较早,soil moisture, drought stress 和 functional traits 这 3 个关键词热度高峰时间较晚,至今热度依然很高,表明相关内容具有广阔研究前景(图 7B)。

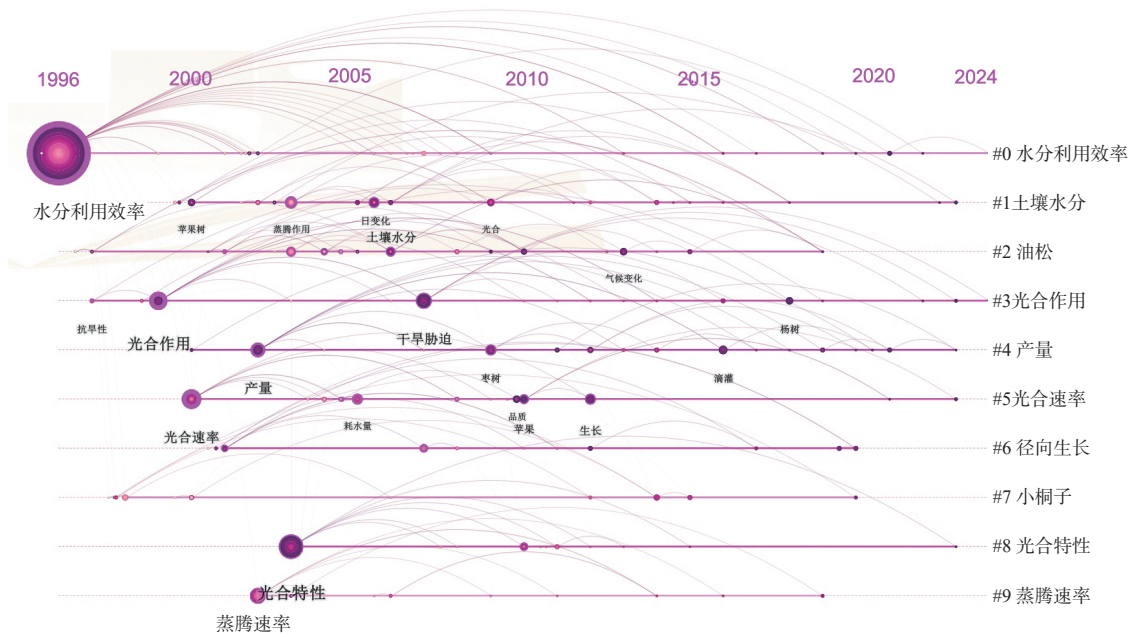


图 5 中文论文中关键词出现的时间线
Fig. 5 Timeline of keywords in Chinese papers

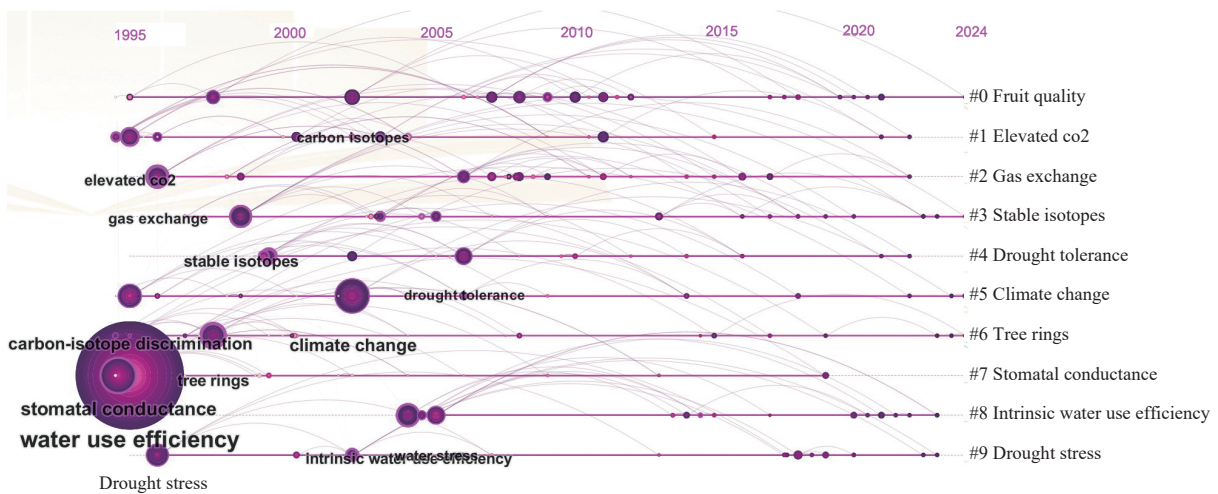


图 6 英文论文中关键词出现的时间线
Fig. 6 Timeline of keywords in English papers

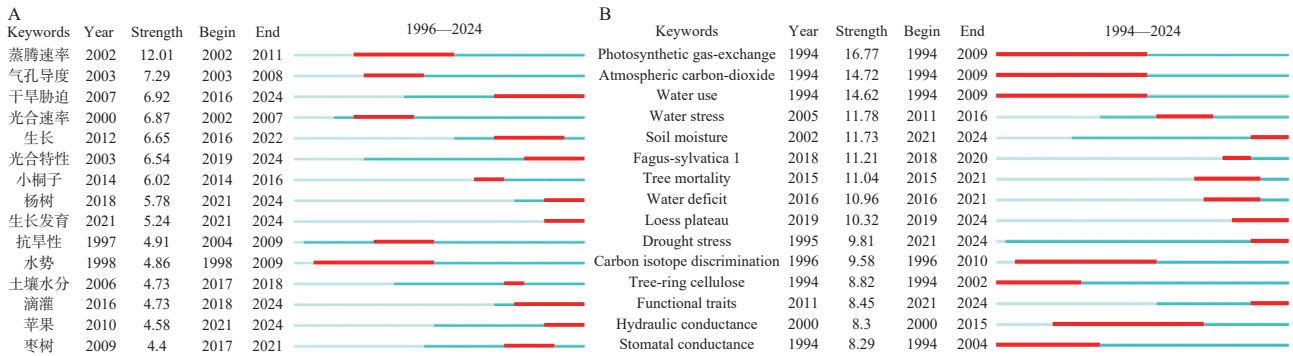


图7 论文中的关键词突现图
Fig. 7 Emerging keywords in papers

注: A.中文论文; B.英文论文。

Notes: A.Chinese paper; B.English paper.

3 讨论

3.1 国内外相关研究的差异

近年来,国内外对水分利用效率的研究热度持续上升(Di Matteo et al., 2017),论文发表的数量呈明显增长的趋势。与英文论文相比,虽然中文论文发文数量少、刊出时间晚,但从年发文比例来看,二者相差较小,且中文论文快速上升的时间早于英文论文,表明国内学者关注水分利用效率研究的时间更早。

在中文和英文论文中,出现数量最高的关键词均为水分利用效率,表明在中文和英文期刊发表的论文对于树木水分利用效率方面的研究关注点是相同的。不同的是,中文论文中光合速率、蒸腾速率、气孔导度等关键词出现的次数较多,表明中文论文更专注树木的生理变化;英文论文中干旱和碳同位素等关键词排序靠前,表明英文论文更关注环境对树木的影响以及新方法新技术的应用。这可能与作者投稿习惯有关,多数作者更倾向于把与新技术新方法有关的论文投稿到国外期刊。

除此之外,中文论文聚焦树木短期生理变化更多,测定指标主要集中在光合速率、光合特性和蒸腾速率等;英文论文除了气孔导度之外还集中在气候变化、树木年轮和碳同位素等内容,更聚焦树木长期生理变化。树木年轮宽窄变化反映出树木全生命周期过程中的气候条件(贾飞飞等, 2024);水分利用效率则反映树木在生长过程中的水碳利用情况(管崇帆等, 2024),其与抗旱性密切相关,水分利用效率高的植物往往具有更强的抗旱性。通过追溯研究长期的水分利用效率,并与适应干旱环境的生理和形态特征相结合,可以获得植物对干旱环境的长期适应和响应机制(张桂玲等, 2021)。

国内外论文对于水分利用效率的研究形成了不同的研究类群。中文论文中,水分利用效率和土壤水分排在类群的前两位,而英文论文排序前两位的是果实品质、CO₂浓度升高,这主要与研究所关注的热点不同有关。中文论文研究热点分别是蒸腾速率、气孔导度和干旱胁迫等,持续时间较长;英文论文研究热点是光合气孔交换、大气CO₂和水分利用。由于国外对树木水分研究起步较早,研究对象主要是果树,因此果实品质及其影响因素CO₂和水成为研究热点;而国内研究起步较晚,研究对象是油松和小桐子等,因此干旱胁迫下的蒸腾速率和气孔导度变化成为研究热点。

3.2 未来的研究热点

未来,随着全球气候变暖导致水资源短缺问题日益加剧,提高植物水分利用效率将节约有限的水资源和提升单位面积生产力,增强其对于干旱环境响应和适应能力,有助于维护生态平衡以及促进农林业的可持续发展。深入理解植物水分利用效率与生态适应机制之间的关系,对于制定干旱地区的植被恢复与管理策略具有重要意义(Di Matteo et al., 2017)。因此,对于水分利用效率研究的热点将会持续和发展。

未来,利用光合气体交换法测定瞬时水分利用效率和稳定同位素技术测定长期水分利用效率的方法将会继续得到应用与发展,但需对其局限性进行完善和改进,如双同位素法(¹³C与¹⁸O)不仅可以精确测定树木的水分利用效率(Flanagan et al., 2014),同时能分辨树木水分的来源(陈燕等, 2024)。此外,还应积极探索计算水分利用效率的新方法,例如叶绿素荧光(王雪梅, 2023)、遥感(刘潇忆等, 2023)和模型(陈森等, 2024),尽可能拓展多尺度的研究方法(杜晓铮等, 2018)。随着计算机技术的发展,水分利用效率

模型构建将是重要研究领域之一(陈森等, 2024), 国外对此领域的研究较早, 国内在 20 世纪 90 年代才出现有关水分利用效率模型的研究。因此, 如何构建科学合理的水分利用效率模型并进行预测将是今后的研究热点之一。

当遭受干旱、热浪、昆虫袭击、病害侵染等非生物或生物胁迫时, 树木中的水碳平衡被破坏, 大部分情况下树木的水分利用效率将升高(Sun et al., 2018; Baharim et al., 2024; Camarero et al., 2019), 树木将充分利用有限水资源来适应环境胁迫, 但也发现在树木衰退过程中, 衰退树木水分利用效率比健康树木低(Pellizzari et al., 2016; Colangelo et al., 2017)。近年来, 利用丛枝菌根真菌为植物根系提供保护, 使其免受非生物胁迫, 提高水分利用效率, 极大地改善了干旱胁迫下的植物生长(Tang et al., 2022)。

同时, 还需重视水分利用效率研究成果的应用。从目前情况看, 不同时空尺度和不同方法的水分利用效率研究均取得了重要的成果, 但重研究轻应用现象普遍存在, 相关新技术、新理论的应用有较大的空间。在未来, 可以把水分利用效率与抗性基因筛选相结合(Bai et al., 2018; Blankenagel et al., 2022)来筛选抗旱和抗盐碱的植物; 筛选高水分利用效率和高品质的草莓 *Fragaria ananassa* Duch.(Grant et al., 2012)、核桃 *Juglans regia* L.和苹果 *Malus pumila* Mill.(赵爽等, 2024)等经济林品种也是重要的发展方向。此外, 在同样的水分条件下, 水分利用效率低的树种生长和发育将受到限制(Baharim et al., 2024), 甚至出现水分亏缺导致的健康问题。因此, 将水分利用效率与水力学、碳饥饿以及叶片功能性状等相结合, 能够了解树木对水分的利用, 评估树木健康程度, 为树木健康管理提供科学依据。

4 结论

近 40 年来, 国内外对水分利用效率的研究发展迅速。中文论文刊出量少于英文, 但相关论文数量快速上升的时间早于英文论文。中文论文更聚焦树木的短期生理变化, 光合速率、蒸腾速率、气孔导度等关键词排序靠前; 英文论文则更关注气候变化和树木长期生理变化以及新研究方法的应用, 气候变化、树木年轮、碳同位素等关键词排序靠前, 国内外形成了不同的研究类群。在研究热点上, 中文论文关键词干旱胁迫、光合特性等热度较高; 在英文论文中, 土壤水分和功能性状热度较高。因此, 对水分利用效率的研究在前述几个方面具有广阔前景。

参 考 文 献

- 陈森, 刘顺, 许格希, 等. 2024. 基于 $\delta^{13}\text{C}$ 估算水分利用效率的 2 种模型比较: 以峨眉山雷洞坪植物为例[J]. 陆地生态系统与保护学报 (2): 14-23.
- (Chen M, Liu S, Xu G X, et al. 2024. Comparison of two models estimating water use efficiency based on $\delta^{13}\text{C}$: A case study of plant species in leidongping, Emei Mountains of China[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation.(2): 14-23.)
- 陈燕, 杨慧, 宁静, 等. 2024. 重度干旱条件下典型岩溶区植被恢复过程中植物水分利用来源和效率研究[J]. 生态环境学报, 33(10): 1534-1543.
- (Chen Y, Yang H, Ning J, et al. 2024. Plant water use sources and efficiency during vegetation restoration in typical Karst area under severe drought conditions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 33(10): 1534-1543.)
- 杜晓铮, 赵祥, 王昊宇, 等. 2018. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J]. 生态学报, 38(23): 8296-8305.
- (Du X Z, Zhao X, Wang H Y, et al. 2018. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(23): 8296-8305.)
- 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 2014. 中国黑河下游荒漠河岸林植物群落水分利用策略研究[J]. 中国科学: 地球科学, 44(4): 693-705.
- (Fu A H, Chen Y N, Li W H 2014. Study on water use strategy of plant community in desert riparian forest in the lower reaches of Heihe River in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 44(4): 693-705.)
- 管崇帆, 高翔, 李志鹏, 等. 2024. 辽西地区樟子松人工林生产力和水分利用效率对气候变化的响应及预测[J]. 林业科学, 60(7): 28-39.
- (Guan C F, Gao X, Li Z P, et al. 2024. Response and prediction of productivity and water use efficiency of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in western Liaoning province to climate change[J]. Scientia Silvae Sinicae, 60(7): 28-39.)
- 胡化广, 张振铭, 吴生才, 等. 2013. 植物水分利用效率及其机理研究进展[J]. 节水灌溉 (3): 11-15.
- (Hu H G, Zhang Z M, Wu S C, et al. 2013. Advance of research on water use efficiency of plant and its mechanism[J]. Water Saving Irrigation, (3): 11-15.)
- 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 等. 2009. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 29(3): 1498-1507.
- (Hu Z M, Yu G R, Wang Q F, et al. 2009. Ecosystem level water use efficiency: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 29(3): 1498-1507.)
- 黄健强, 邓永红, 曾小平, 等. 2020. 南亚热带针阔叶混交林生态系统水分利用效率[J]. 生态学报, 39(8): 2538-2545.
- (Huang J Q, Deng Y H, Zeng X P, et al. 2020. Water-use efficiency in a mixed conifer-broadleaf forest ecosystem in lower subtropical China[J]. Chinese Journal of Ecology, 39(8): 2538-2545.)
- 贾飞飞, 孙茹, 李鑫, 等. 2024. 昌岭山油松年内径向生长特征及其对气候的响应[J]. 生态学报, 43(1): 170-176.
- (Jia F F, Sun R, Li X, et al. 2024. Intra-annual stem radial growth characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its response to climate on Changling Mountain[J]. Ecological Science, 43(1): 170-176.)
- 刘超, 胡正华, 陈健, 等. 2018. 不同 CO_2 浓度升高水平对水稻光合特性的影响[J]. 生态环境学报, 27(2): 246-254.

- (Liu C, Hu Z H, Chen J, *et al.* 2018. Effects of elevated CO₂ concentration levels on photosynthetic characteristics of rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(2): 246–254.)
- 刘潇忆, 刘超, 聂锐华, 等. 2023. 2000—2014年黄河源水分利用效率时空变化及其影响因素[J]. *灌溉排水学报*, 42(9): 61–67.
- (Liu X Y, Liu C, Nie R H, *et al.* 2023. Spatiotemporal variation in water use efficiency and its determinants in 2000—2014 in the source region of Yellow River[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 42(9): 61–67.)
- 田金园, 袁凤辉, 关德新, 等. 2022. 长白山阔叶红松林5种主要树种水分利用效率与叶片养分特征[J]. *应用生态学报*, 33(2): 304–310.
- (Tian J Y, Yuan F H, Guan D X, *et al.* 2022. Water use efficiency and leaf nutrient characteristics of five major tree species in broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33(2): 304–310.)
- 王雪梅. 2023. 18种槭树科树种光合特性及叶绿素荧光参数的比较[J]. *西北林学院学报*, 38(6): 123–129.
- (Wang X M 2023. Comparison of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters among 18 *Aceraceae* species[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 38(6): 123–129.)
- 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝. 2001. 六种木本植物水分利用效率和其小生境关系研究[J]. *生态学报*, 21(11): 1952–1956.
- (Yan C R, Han X G, Chen L Z. 2001. Water use efficiency of six woody species in relation to micro-environmental factors of different habitats[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(11): 1952–1956.)
- 张桂玲, 李艳琴, 罗绪强, 等. 2021. 季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化[J]. *地球与环境*, 49(1): 25–31.
- (Zhang G L, Li Y Q, Luo X Q, *et al.* 2021. Change of water use efficiency of different species in Karst secondary forest under seasonal drought[J]. *Earth and Environment*, 49(1): 25–31.)
- 张玮, 谢锦忠. 2011. 林木水分利用率的概念及其研究进展[J]. *安徽农业科学*, 39(4): 2120–2122.
- (Zhang W, Xie J Z. 2011. Concept and research of water use efficiency in forest trees[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(4): 2120–2122.)
- 赵爽, 马子清, 李雪薇, 等. 2024. 不同果实生长期亏缺灌溉对渭北苹果生长、品质及水分利用效率的影响[J]. *西北植物学报*, 44(3): 345–352.
- (Zhao S, Ma Z Q, Li X W, *et al.* 2024. Effect of water deficiency on growth, qualities, and water use efficiency of apple in Weibei area of Shaanxi in different fruit developmental periods[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 44(3): 345–352.)
- Baharim M S A, Adnan N A, Anuar M I, *et al.* 2024. Relationship analysis between Ganoderma boninense-derived Basal Stem Rot disease severity with multiple leaf physiology parameters in mature oil palm tree responses toward water use efficiency (WUE)[J]. *Journal of Plant Pathology*, 106(4): 1801–1816.
- Bai H, Purcell L C. 2018. Response of carbon isotope discrimination and oxygen isotope composition to mild drought in slow- and fast-wilting soybean genotypes[J]. *Journal of Crop Improvement*, 32(2): 239–253.
- Birhane E, Sterck F J, Fetene M, *et al.* 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions[J]. *Oecologia*, 169(4): 895–904.
- Blankenagel S, Eggels S, Frey M, *et al.* 2022. Natural alleles of the abscisic acid catabolism gene ZmAbh4 modulate water use efficiency and carbon isotope discrimination in maize[J]. *The Plant Cell*, 34(10): 3860–3872.
- Camarero J J, González de Andrés E, Sangüesa-Barreda G, *et al.* 2019. Long- and short-term impacts of a defoliating moth plus mistletoe on tree growth, wood anatomy and water-use efficiency[J]. *Dendrochronologia*, 56: 125598.
- Colangelo M, Camarero J J, Battipaglia G, *et al.* 2017. A multi-proxy assessment of dieback causes in a Mediterranean oak species[J]. *Tree Physiology*, 37(5): 617–631.
- Di Matteo G, Nardi P, Fabbio G. 2017. On the use of stable carbon isotopes to detect the physiological impact of forest management: The case of Mediterranean coppice woodland[J]. *Forest Ecology and Management*, 389: 158–166.
- Flanagan L B, Farquhar G D. 2014. Variation in the carbon and oxygen isotope composition of plant biomass and its relationship to water-use efficiency at the leaf- and ecosystem-scales in a northern Great Plains grassland[J]. *Plant, Cell & Environment*, 37(2): 425–438.
- Grant O M, Davies M J, James C M, *et al.* 2012. Thermal imaging and carbon isotope composition indicate variation amongst strawberry (*Fragaria × Ananassa*) cultivars in stomatal conductance and water use efficiency[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 76: 7–15.
- Pellizzari E, Camarero J J, Gazol A, *et al.* 2016. Wood anatomy and carbon-isotope discrimination support long-term hydraulic deterioration as a major cause of drought-induced dieback[J]. *Global Change Biology*, 22(6): 2125–2137.
- Sangüesa-Barreda G, Linares J C, Camarero J J. 2015. Reduced growth sensitivity to climate in bark-beetle infested Aleppo pines: Connecting climatic and biotic drivers of forest dieback[J]. *Forest Ecology and Management*, 357: 126–137.
- Simon N M L, Graham C A, Comben N E, *et al.* 2020. The circadian clock influences the long-term water use efficiency of *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 183(1): 317–330.
- Sun S J, Qiu L F, He C X, *et al.* 2018. Drought-affected *Populus simonii* carr. show lower growth and long-term increases in intrinsic water-use efficiency prior to tree mortality[J]. *Forests*, 9(9): 564.
- Sun S J, Zhang J S, Yin C J, *et al.* 2022. Stable isotopes reveal differences in climate sensitivity and physiological responses between dieback and healthy trees in a shelter forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 325: 109090.
- Tang H Y, Hassan M U, Feng L, *et al.* 2022. The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops[J]. *Frontiers in Plant Science*, 13: 919166.
- Zhou S, Yu B F, Zhang Y, *et al.* 2016. Partitioning evapotranspiration based on the concept of underlying water use efficiency[J]. *Water Resources Research*, 52(2): 1160–1175.