

## 基于文献计量的植物 WUE 研究现状分析

马 勤<sup>1</sup>, 杨继涛<sup>2</sup>, 琚彤军<sup>3</sup>, 李秧秧<sup>3\*</sup>, 康博文<sup>1</sup>, 同金霞<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨陵 712100;  
3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:** 全面了解植物水分利用效率(WUE)研究现状可为未来该领域研究方向的确立和发展趋势预测提供依据。为此, 基于 Web of Science(WoS)核心合集的科学引文索引数据库, 采用 VOSviewer 文献计量分析软件对植物 WUE 研究 2000—2021 年发表的相关文献进行分析。结果表明, 1) 2000—2021 年世界范围内该领域发文数量呈抛物线式增长趋势, 载文量较多的期刊有 *Agricultural Water Management*, *Field Crops Research*, *Agricultural and Forest Meteorology* 等, 发文量前 3 的国家为中国、美国和澳大利亚, 发文量前 3 的机构为中国科学院、西北农林科技大学和中国农业大学, 发文量前 3 的作者为 Liu Fulai, Kang Shaozhong, H. Medrano, 该领域大多数研究者之间合作关系较少; 2) 尽管中国学者发文数量最多, 但有影响力和高被引用论文数量少; 3) 目前该领域主要的研究方向可分为 3 类, 植物 WUE 种间或种内差异的生理或分子机制、灌溉和施肥等田间管理措施对作物 WUE 的影响与调控、气候变化对陆地生态系统 WUE 的影响; 4) 基于关键词热点分析和热点论文分析, 给出了未来植物 WUE 研究需要加强的方面。

**关键词:** 文献计量分析; VOSviewer; 科学引文索引数据库; 植物; 水分利用效率(WUE)

**中图分类号:** Q945.79

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-7461(2022)06-0266-07

### An Analysis of Present Status in Plant Water Use Efficiency Research Based on Bibliometrics

MA Qin<sup>1</sup>, YANG Ji-tao<sup>2</sup>, JU Tong-jun<sup>3</sup>, LI Yang-yang<sup>3\*</sup>, KANG Bo-wen<sup>1</sup>, TONG Jin-xia<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. College of Economics & Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** Grasping the present status in the study of plant water use efficiency (WUE) can provide evidence for determining future research direction and forecasting future developmental trends in this field. Based on the Science Citation Index-Expanded (SCIE) database of core collection of web of Science (WOS), the selected literatures from 9 disciplines related to plant WUE research in recent 22 years (2000—2021) were analyzed by VOSviewer bibliometric analysis software. The results indicated that 1) the publications in this field showed a parabolic increase, and the top three journals with most publications were *Agricultural Water Management*, *Field Crops Research*, *Agricultural and Forest Meteorology*. The top three countries were China, USA and Australia, and the top three organizations were Chinese Academy of Sciences, Northwest A&F University and Chinese Agricultural University, the top three authors were Liu Fulai, Kang Shaozhong and Medrano H., most authors in this field were seldom connected with others. 2) Although Chinese scholars had the most publications, they produced few influential and highly-cited papers. 3) Researches in this field could be classified into three clusters: interspecific and intraspecific varia-

收稿日期: 2022-05-26 修回日期: 2022-07-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)子课题(XDB40020202); 中国农业期刊基金项目(CAJW2021-055)。

第一作者: 马 勤, 硕士。研究方向: 科技期刊编辑及文献计量分析。E-mail: maqin@126.com

\* 通信作者: 李秧秧, 博士, 研究员。研究方向: 植物生理生态。E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

tion of plant WUE and related physiological and molecular mechanisms, effects and regulation of irrigation and other management practices on crop WUE, effects of climate change on WUE of terrestrial ecosystem. 4) Based on hot spot analysis on keywords and papers, some points that needed to be strengthened in the future were presented for plant WUE.

**Key words:** bibliometric analysis; VOSviewer; SCIE; plants; water use efficiency(WUE)

水分是限制世界上大多数地区植物生产力提高的主要因素,随着世界范围水资源日趋短缺和气候变化导致的干旱程度加剧,提高植物水分利用效率(WUE)已成为农林生产上迫切面对的问题。据统计,世界耕地总面积为  $1.40 \times 10^9 \text{ hm}^2$ , 80%以上耕地的农业生产依靠天然降水<sup>[1]</sup>。全球气候变化导致  $\text{CO}_2$  质量浓度、温度、蒸汽压亏缺升高,干旱及热波发生的频率和强度均会增加,越来越多的植物将面临水分亏缺的威胁,在此背景下如何提高植物WUE是农林业面临的迫切需求,亦是目前农学、林学、生理学、生态学和农业水土工程等多门学科研究的热点。植物WUE是指植物利用单位水所能固定的碳量<sup>[2]</sup>,研究植物WUE不仅有助于了解植物对干旱的适应对策、筛选高WUE和高产的作物和品种及寻找适于干旱半干旱地区的农田管理措施,而且对深刻揭示全球气候变化背景下生态系统水碳耦合关系亦有重要价值<sup>[3]</sup>。植物WUE具有明显的空间(叶—整株植物—种群—生态系统—景观)与时间(瞬时—某段时间—一年或生活史—多年)属性,驱动不同空间和时间尺度WUE的因素并不相同<sup>[4-5]</sup>,因而使得植物WUE研究变得尤为复杂。据Web of Science核心合集,1985—2021年以water use efficiency为主题共有16.5万条文献。尽管对植物WUE进行了大量研究,但关于植物WUE相关内容的计量整合分析尚未见到。

文献计量分析利用数学和统计学的方法对所筛选出的文献进行多方位、全角度的综合分析,明晰该研究领域的研究重点和发展趋势,因而具有强大的揭示、评价和趋势预测功能<sup>[6]</sup>。文献计量分析通过对某一研究领域进行定量分析,实现对研究领域的热点文献、热点主题和知识演进等的可视化,有助于研究人员更好地把握相关研究领域的动态变化和发展趋势<sup>[7-8]</sup>。VOSviewer是荷兰莱顿大学科技研究中心的van Eck和Waltman开发的一款用于构建和可视化文献计量网络的工具,因其简单易用且可视化功能强大而得以普遍应用<sup>[9]</sup>。为此,本研究基于Web of Science(WoS)核心数据库,采用该可视化软件,对国内外2000—2021年植物WUE研究的发文数量及刊物、主要国家、研究机构和学者、关键词聚类、文献共被引及高被引论文等进行了计量

分析,重点关注植物WUE研究的热点和有影响力的论文,旨在全面梳理当今植物WUE研究现状,为未来植物WUE研究和调控提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究文献来源于WoS核心合集集中的科学引文索引数据库(SCIE),为了提高检准率,检索标题中包含检索词Water use efficiency的文献,检索时间为2022年3月15日,选择时间跨度为2000年1月1日—2021年12月31日,同时,从100多个学科类别中选择与植物水分利用效率最相关的农学、水资源、植物科学、环境科学、农业多学科、林学、生态学、土壤科学和园艺学9个学科以Article与Review形式发表的论文,共筛选文献2 829篇。

### 1.2 研究方法

利用WoS自带分析检索结果功能,对2000—2021年发表的2 829篇文献进行发文国家/地区、期刊的计量分析,并根据被引频次确定高引用论文。采用VOSviewer<sup>[9]</sup>的Co-authorship功能分析发文国家、机构与作者之间合作紧密程度,阈值分别设定为8,18,7;通过共现分析(co-occurrence)选定所有关键词(all keywords)选项统计出现频率较多的关键词,反映该领域的研究热点,阈值设置为30;通过共引用(co-citation)分析确定研究时段影响较大的文献。

## 2 结果与分析

### 2.1 文献产出趋势分析

基于WoS核心合集的SCIE数据库共检索到符合条件的论文2 829篇。2006年之前,每年的发文数量在50篇左右,其后年发文数量呈抛物线式增长,到2021年,年发文数量已达364篇,比2000年增加了7.9倍;累积发文量亦呈抛物线式增长(图1),表明有关植物WUE相关研究在近20 a来呈快速增长的态势。发文主要集中在农学、水资源、植物科学和环境科学等领域,其中农学类发文数量(1 088篇)最多,所占比例为38.5%;水资源、植物科学、环境科学发文数量分别为627、611、563篇,所占比例分别为22.2%、21.6%、19.9%,相互之间差异不大。由于植物水分利用效率研究目前在农作物

(小麦、玉米、水稻、棉花、马铃薯、葡萄等)上研究得较多,因而农学类刊物发文数量最多。

发文数量位列前 10 的学术期刊详见表 1,发文量较多的学术期刊包括《Agricultural Water Management》(344 篇)、《Field Crops Research》(99 篇)、《Agricultural and Forest Meteorology》(58 篇)、《Scientia Horticulturae》(53 篇)和《Water》(51 篇)等,其中,影响因子 $>5.0$  的期刊有《Science of the Total Environment》《Frontiers in Plant Science》《Agricultural and Forest Meteorology》和《Field Crops Research》。总引用次数最高的是《Agricultural Water Management》(11 791 次),其次分别为《Field Crops Research》(4 960 次)和《Agricultural and Forest Meteorology》(2 076 次),平均单篇引用次数最高的是《Field Crops Research》和

《Agronomy Journal》,均为 50 次,而《Agricultural and Forest Meteorology》(36 次)和《Agricultural Water Management》(34 次)次之。

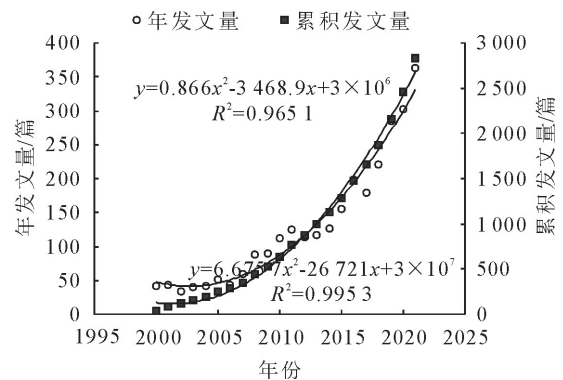


图 1 植物 WUE 研究文献 2000—2021 年发文章量

Fig. 1 Annual and accumulated papers published on plant water use efficiency during 2000—2021

表 1 植物 WUE 研究文献 2000—2021 年发文章量前 10 期刊

Table 1 Top ten journals in number of publications on plant water use efficiency

排名	期刊名称	发文章量	比例(%)	2021 年 影响因子	总引用次数	平均单篇 引用次数
1	Agricultural Water Management	344	12.16	4.516	11 791	34
2	Field Crops Research	99	3.50	5.224	4 960	50
3	Agricultural and Forest Meteorology	58	2.05	5.734	2 076	36
4	Scientia Horticulturae	53	1.87	3.463	1 398	26
5	Water	51	1.80	3.103	367	7
6	Agronomy Basel	49	1.73	—	191	4
7	Indian Journal of Agricultural Sciences	48	1.70	0.371	169	3
8	Frontiers in Plant Science	43	1.52	5.753	843	20
9	Science of the Total Environment	43	1.52	7.963	667	15
10	Agronomy Journal	41	1.45	2.240	2 037	50

## 2.2 发文章的国家/地区与机构间合作关系

在 VOSviewer 合作网络中分析图中(图 2),圆圈大小表征相应国家或机构的发文章情况,圆圈越大表明发文章数量越多;各圆圈之间连线表征个体之间的联系,连线愈密集合作关系愈强。在所搜集的 2 829 篇文献中,以中国发文章量最多(983 篇,所占比例为 34.7%),其次为美国(537 篇,所占比例为 19.0%)、澳大利亚(263 篇,所占比例为 9.3%)、印度(207 篇,所占比例为 7.3%)和西班牙(159 篇,所占比例为 5.9%)。这些国家农业生产都面临严重的干旱问题,因而发文章数量多。网络分析显示中国、美国与其他国家联系最为密切,与中国联系最多的国家/地区为美国、澳大利亚和加拿大等。研究机构中,以中国科学院发文章数量最多(308 篇,所占比例为 10.9%),其次为西北农林科技大学(166 篇,所占比例为 5.9%),中国农业大学(113 篇,所占比例为 4.0%)、中国科学院大学(90 篇,所占比例为 3.2%)和美国农工部(68 篇,所占比例为 2.4%);中国科学

院、西北农林科技大学和中国科学院大学和其他机构的联系最为密切(图 3)。

## 2.3 发文章作者间合作分析

作者发文章排名前 10 的详见表 2。其中 Liu Fulai(丹麦哥本哈根大学)发表文章最多,共 27 篇,该学者主要从事灌溉技术及施肥措施等影响植物水分利用效率的生理机制研究。排名第 2 的作者为中国农业大学康绍忠院士,发表相关论文 24 篇,其研究领域主要为节水灌溉技术对作物需水量、水分利用效率的影响。排名第 3 和第 4 的 H. Medrano 和 J. Flexas(均为西班牙巴利阿里群岛大学)发文章数量分别为 21 篇和 20 篇,这 2 位学者的研究主要集中在地中海园艺植物,特别是葡萄水分利用效率相关生理和调控研究;其引文总联系强度高达 45 和 40,说明这 2 位专家与同领域专家的交流合作更多且发表的文章更有影响力(图 4)。发文章数量排名前 10 的作者中,中国学者占 7 个,说明我国在植物水分利用效率研究领域处于世界先进水平。植物 WUE 研

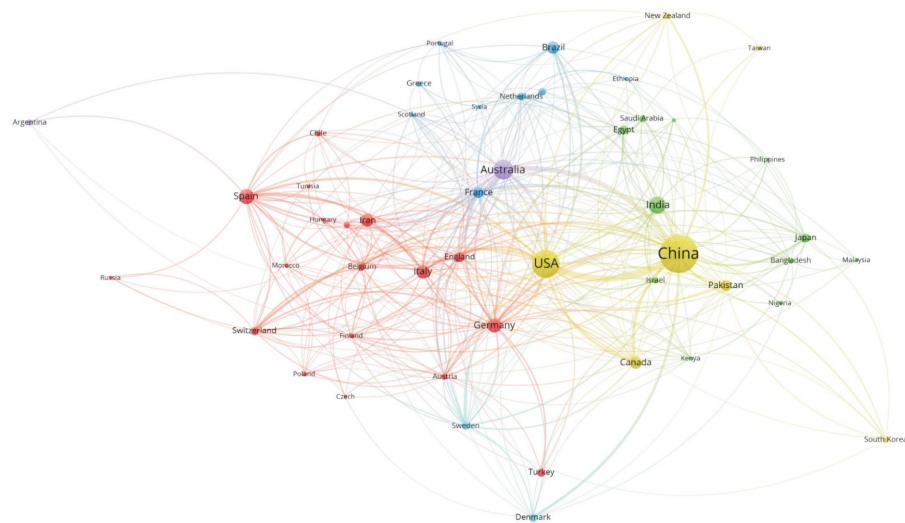


图 2 植物 WUE 研究文献产出国家/地区之间合作网络分析

Fig. 2 Collaborative relationships between countries that contribute these papers

表 2 植物 WUE 研究发文量排名前 10 的作者

Table 2 Top 10 authors in number of papers

排名	作者	发文量	总联系强度	排名	作者	发文量	总联系强度
1	Liu Fulai	27	28	6	Du Taisheng	16	30
2	Kang Shaozhong	24	29	7	Anderson MN	15	13
3	Medrano H	21	45	8	Li Fusheng	14	23
4	FlexasJ	20	40	9	Zhang Jihanhua	13	17
5	Zhang Fucang	16	36	10	Fan Junliang	12	28

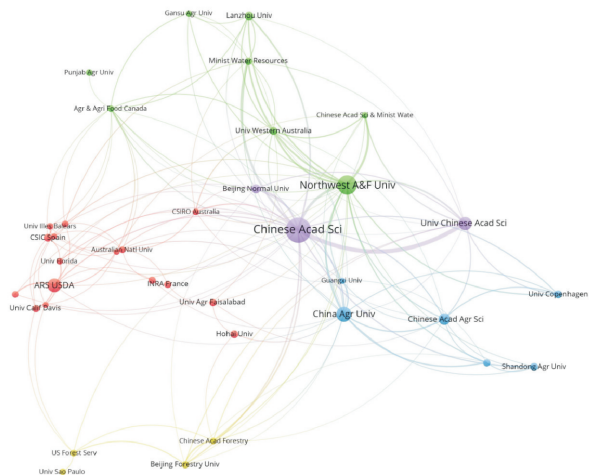


图 3 植物 WUE 研究文献产出机构之间合作网络分析

Fig. 3 Collaborative relationships between organizations that contribute these papers

究领域除部分研究者(H. Medrano,J. Flexas,Kang Shaozhong 等)的合作关系网较密集外,大部分研究者的合作相对较少。

2.4 关键词共现分析

基于 VOSviewer 可视化软件对文献的关键词进行共现分析,结果如图 5 所示。其中节点大小代表关键词出现的次数,不同颜色代表不同的聚类。



图 4 植物 WUE 研究论文作者之间合作网络分析

Fig. 4 Collaborative relationships between authors that contribute these papers

筛选后的关键词可分为 3 类:第 1 类主要包括 yield, productivity, nitrogen, irrigation, management, wheat, maize 等(cluster 1, 红色),这类研究主要关注水肥、灌溉等管理措施对作物产量和 WUE 的影响,且多为田间试验。第 2 类主要包括 growth, carbon isotope discrimination, drought, stress, gas-exchange, photosynthesis, stomatal con-



ductance 等(cluster 2,绿色),主要研究干旱等胁迫影响植物水分利用效率的生理机制,特别是利用碳同位素技术研究水分利用效率是这方面的一个重要研究内容。第3类研究主要包括 water use efficiency, evapotranspiration, carbon dioxide, climate change 等,这类研究更关注全球气候变化对森林生态系统蒸散发和水分利用效率的影响(cluster 1,蓝色),研究的尺度更大。在搜集的 2 829 篇文献中,共有 35 篇热点论文,其中偏重 WUE 生理机理和分子生物学研究为 16 篇,偏重全球气候变化与陆地生态系统 WUE 关系的比例为 14 篇,而灌溉等管理措施对 WUE 影响与调控的仅为 5 篇,说明前 2 个领域是目前植物 WUE 研究的相对热点领域。

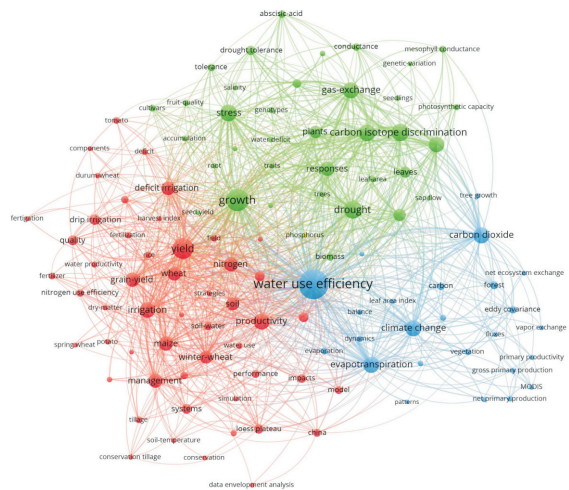


图 5 植物 WUE 研究文献关键词共现网络分析

Fig. 5 Keyword co-occurrence network analysis

## 2.5 文献共被引分析

文献共被引(co-citation)是可以反映文献之间的紧密关系。由图 6 可以看出,植物 WUE 领域有 2 篇重要论文,一篇为 Farquhar 等<sup>[10]</sup>发表在《Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology》上的综述性论文“Carbon isotope discrimination and photosynthesis”,该论文系统论述了不同功能型植物( $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_3-C_4$  中间型、CAM 植物、水生植物和海藻)光合作用中的碳同位素辨别力、环境因素(光、水、盐和空气污染等)对碳同位素辨别力的影响,及  $C_3$  植物中碳同位素辨别力和光合作用的关系,从而为碳同位素辨别力作为一种认识光合作用的工具和植物水分生理生态研究中的普遍应用奠定了基础;目前该论文已被共引 311 次。另一篇为 Allen 等<sup>[11]</sup>发表在《FAO irrigation and Drainage》上的论文“Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements”,该篇方法性论文系统介绍了作物蒸散发的计算方法,为作物需水量估算奠定了基础;该篇论文目前已被共引用 306 次。此外, Farquhar 等<sup>[12]</sup>的论文“On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves”, Farquhar 等<sup>[13]</sup>的论文“Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes”, Keenan 等<sup>[14]</sup>的论文“Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise”亦有相对重要的学术影响力。

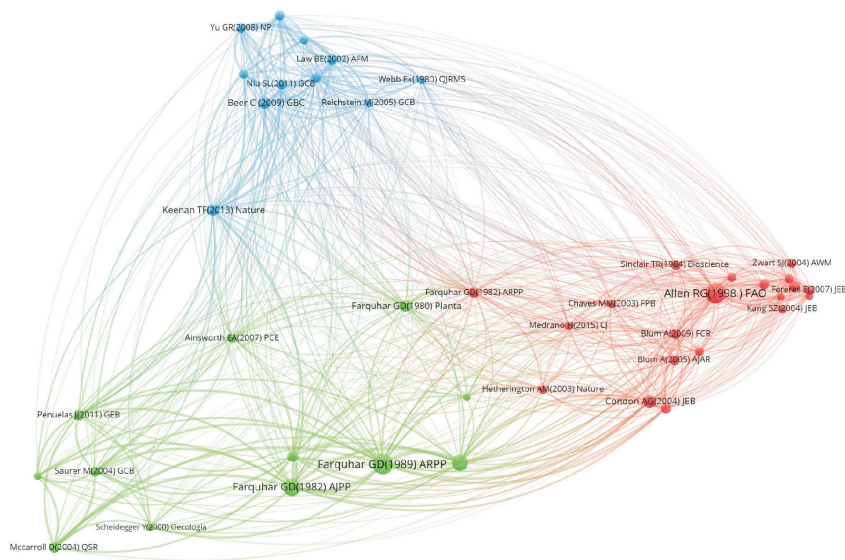


图 6 植物 WUE 研究文献被共引分析

Fig. 6 Co-citation analysis

## 2.6 高被引文献分析

利用 SCIE 数据库的被引频次,排列出了被引

次数最高的前 5 名论文(表 3),其中 Condon 等<sup>[15]</sup>的论文系统总结提高作物水分利用效率的 3 个途

径:尽可能使更多的水分经过植物而不是被蒸发、渗漏或遗留在收获后的土壤;蒸腾的水分尽可能生产更多的碳(如提高蒸腾效率);尽可能使更多生物量分配到收获产品中,并提出基于碳同位素筛选的高叶水平水分利用效率并不一定代表高的作物群体水分利用效率或产量。Blum<sup>[16]</sup>的论文首次区分了耐旱性、水分利用效率和产量势 3 个名词之间的差异。Deng<sup>[17]</sup>则给出了中国干旱半干旱地区主要作物的水分利用效率,并提出了改善作物 WUE 途径。

表 3 植物 WUE 研究被引频次排名前 5 的文献

Table 3 The top 5 highly-cited literatures of plant WUE research

排名	论文题目	第一作者	刊名	年份	被引频次/次
1	Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential -are they compatible, dissonant or mutually exclusive?	Blum A	Aust. J. Agr. Res.	2005	806
2	Breeding for high water-use efficiency	Condon A G	J. Exp. Bot.	2004	779
3	Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise	Keenan T E	Nature	2013	700
4	Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress	Blum A	Field Crops Res.	2009	700
5	Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China	Deng X P	Agr. Water Manage	2006	599

3 结论与展望

VOSviewer 文献计量分析能够很好地展示研究领域内的知识图谱,能够对所筛选出的文献进行多方位、全角度的综合分析,能够构建植物 WUE 研究领域内热点文献计量学指标可视化分析以及学科图谱,有助于学者们更好地把握该研究领域的动态变化和发展趋势。利用 VOSviewer 软件对近来植物 WUE 研究领域的文献进行计量分析,得到如下主要结论:1)2000—2021 年与植物 WUE 相关研究发表数量呈抛物线式增长,发文最多的学科为农学类,发文量前 10 期刊里农学类刊物比例为 70%。2)我国在植物 WUE 研究方面的发文数量位列世界第 1,发文量位列世界前 5 的研究机构中中国占 4 个,发文数量位居前 10 的作者中国有 7 个,表明我国在植物 WUE 研究领域的水平处于世界先进水平,但发表的有影响力的重要论文和高被引论文、热点论文相对较少,表明我国学者的论文水平和影响力仍有待进一步提高。3)近 22 a 来植物 WUE 研究主要集中在植物 WUE 差异的生理与分子机制、灌溉和施肥等管理措施对作物产量和 WUE 的影响与调控及全球气候变化对生态系统 WUE 影响与预测。

未来植物 WUE 研究在以下方面有待加强:1)随着分子生物学的发展和全球气候变化加剧,未来植物 WUE 研究从微观上,将集成表型、模型模拟、

Blum<sup>[18]</sup>的论文认为有限水分条件下以筛选高 WUE 为目标的育种会导致作物产量或抗旱性的降低,以最大摄取蒸腾用土壤水分才是干旱胁迫下产量改进的重要目标。上述 4 篇综述性论文都是围绕农作物 WUE 方面研究。Leakey 等<sup>[19]</sup>研究首次发现北半球温带和北方森林的 WUE 近 20 a 来大量增加,这种增加与 CO<sub>2</sub> 肥的效应有关,表明陆地植被碳水经济的转变,该研究为后来大尺度生态系统 WUE 研究奠定了基础。

生理学、遗传学和分子生物学手段,系统研究不同调控基因对植物 WUE 影响<sup>[19]</sup>;从宏观上,将更注重大尺度和长时段生态系统 WUE 与全球气候变化关系的研究,从而为陆地生态系统物质和能量模拟提供支撑。2)由于植物 WUE 研究涉及不同空间尺度(叶片—个体—种群—生态系统—景观)与时间尺度(瞬时—某段时间—一年或生活史—多年),不同尺度 WUE 的区别与联系如何?如何将个体水平上的 WUE 通过尺度扩展上推至区域乃至全球是当前面临的重大挑战。3)WUE 和产量、作物生长之间的联系怎样?对于农田作物,高 WUE 不一定等于高产;对森林植被,20 世纪 WUE 的增加并未引起树木生长的增加<sup>[20]</sup>,热带森林 150 a 来 CO<sub>2</sub> 肥引起 WUE 增加但也未增加树木生长<sup>[21]</sup>,因而需要对不同作物不同森林、草地和农地类型开展大规模研究,从而系统评价 WUE 和产量、生长等生理过程之间的联系。

参考文献:

[1] 王立祥,王龙昌.中国旱区农业[M].南京:江苏科学技术出版社,2009.

[2] 胡中民,于贵瑞,王秋风,等.生态系统水分利用效率研究进展[J].生态学报,2009,29(3):1498-1507.

HU Z M,YU G R,WANG Q F,et al. Ecosystem level water use efficiency:a review[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(3): 1498-1507. (in Chinese)

[3] GUERRIERI R,BELMECHERIC S,OLLINGERA S V,et al.

- Disentangling the role of photosynthesis and stomatal conductance on rising forest water-use efficiency[J]. PNAS, 2019, 116(34):16909-16914.
- [4] 刘茂秀, 史军辉, 王新英, 等. 塔河中游不同生境天然胡杨林木的光合与蒸腾特性[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 9-15.  
LIU M X, SHI J H, WANG X Y, *et al.* Photosynthetic and transpiration characteristics of natural *Populus euphratica* forests in different habitats in the middle reaches of the Tahe River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 9-15. (in Chinese)
- [5] 邱权, 潘昕, 李吉跃, 等. 青藏高原 20 种灌木幼苗生物量分配、水分利用效率及叶片  $\delta^{13}\text{C}$  比较[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 8-14.  
QIU Q, PAN X, LI J Y, *et al.* Comparison on biomass allocation and leaf water use efficiency and  $\delta^{13}\text{C}$  of 20 shrub seedlings in Tibetan Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 29(4): 8-14. (in Chinese)
- [6] 邱均平, 王日芬. 文献计量内容分析法[M]. 北京: 国家图书馆出版社, 2008.
- [7] 赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. 中国图书馆学报, 2010, 36(5): 60-68.
- [8] 孙威, 毛凌潇. 基于 CiteSpace 方法的京津冀协同发展研究演化[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2378-2391.  
SUN W, MAO L X. Evolution of research on Beijing-Tianjin-Hebei cooperative development based on CiteSpace method[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2378-2391. (in Chinese)
- [9] ECK N J, WALTMAN L. Software survey: vosviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
- [10] FARQUHAR G D, EHLERINGER J R, HUBICK K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503-537.
- [11] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]// FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Italy Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.
- [12] FARQUHAR G D, O'LEARY M H, BERRY J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9: 121-137.
- [13] FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11: 539-552.
- [14] KEENAN T F, HOLLINGER D Y, BOHRER G, *et al.* Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise[J]. Nature, 2013, 499(7458): 324-327.
- [15] CONDON A G, RICHARDS R A, REBETZKE G J, *et al.* Breeding for high water-use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2447-2460.
- [16] BLUM A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2005, 56(11): 1159-1168.
- [17] DENG X P. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 23-40.
- [18] BLUM A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress[J]. Field Crops Research, 2009, 112: 119-123.
- [19] LEAKEY A D, FERGUSON J N, PIGNON C P, *et al.* Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  crops[J]. Annual Review of Plant Biology, 2018, 70: 781-808.
- [20] PENUELAS J, CANADELL J G, OGAYA R, *et al.* Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth[J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(4): 597-608.
- [21] VAN DER SLEEN P, GROENENDIJK P, VLAM M, *et al.* No growth stimulation of tropical trees by 150 years of  $\text{CO}_2$  fertilization but water-use efficiency increased[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(1): 24-28.

(卷终)