

近年来光合作用领域的前沿和热点研究

——基于 WOS 高被引论文的科技术语分析

蒋甜¹ 许哲平¹ 陈学娟¹ 卢庆陶² 杨辉霞² 朱学军¹

(1.中国科学院文献情报中心资源建设部 北京 100190; 2.中国科学院植物研究所光生物学重点实验室 北京 100093)

摘要: 科技术语是科技论文的基本要素和重要特征,光合作用研究论文中存在大量的科技术语。基于数据驱动的科技术语分析能够对学科领域的动态发展和演变起到较好的揭示和印证作用。文章以 VOSviewer 软件为主要分析工具,对 Web of Science 数据库中光合作用领域近三年的高被引论文和热点论文中的科技术语进行计量分析和可视化呈现。分析比较的结果表明,近年来光合作用的研究热点集中在“自然光合作用的机理探究”“光合作用与环境变化”“人工光合的应用和发展”三个方向,“光催化剂”成为这几年光合作用领域研究的前沿。

关键词: 光合作用; VOSviewer; 高被引论文; 热点研究; 科技术语

中图分类号: Q945.11; N04 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-8578.2021.01.009

Frontier and Hot Researches in the Field of Photosynthesis: Analysis of Scientific Terms Based on WOS Highly Cited Papers // JIANG Tian, XU Zheping, CHEN Xuejuan, LU Qingtao, YANG Huixia, ZHU Xuejun

Abstract: Terminology is the basic element and significant feature of scientific literatures. Photosynthesis research field contains quantity of scientific terms. In this study, the scientific terms in highly cited papers and hot papers published in the field of photosynthesis in the last three years in the core collection of Web of Science were taken as objects, and VOSviewer software was used as the main tool to carry out bibliometric and visual analysis. Our results show that photosynthesis researches mainly focus on three directions “the mechanism of natural photosynthesis”, “photosynthesis and climate change”, “the application and development of artificial photosynthesis”. Photocatalysts have become the forefront of photosynthesis research in recent years. The data-driven analysis of scientific terms can better reveal and verify the dynamic development and evolution of subjects.

Keywords: photosynthesis; VOSviewer; highly cited papers; hot researches; terminology

文献计量学是对科技文献进行定量分析的有效工具^[1],被广泛用于包括植物科学在内的多个领域的研究趋势评价^[2-3]。李晓曼等^[4]基于文献计量分析了 1995—2018 年植物表型组学研究进展,徐志周等^[5]进行了基于 SCI 的植物菌根信号的文献计量分析,王瑞等^[6]基于文献计量分析对国际小麦科研实力进行了比较研究。

植物科学领域近三年(2017—2019)发表的研究论文中,“光合作用(photosynthesis)”为出现频率

最高的关键词(表 1)。光合作用是地球上最基本的生物过程之一,它为所有高等生物提供氧气,其 CO₂固定过程不仅为地球上的生物提供食物来源,也在控制大气 CO₂浓度方面发挥了重要作用。近年来,大气中 CO₂含量的增加以及随之带来的气候变化将对光合作用产生影响,但其影响的具体机制尚不明确,引起研究人员的广泛关注^[7-8]。此外,光合作用也是植物抗逆、作物高产等研究领域关注的重点,光合作用的研究对于解决全球气候变化对

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 中国科学院文献情报领域引进优秀人才计划; 中国科学院战略性先导科技专项(A类“地球大数据科学专项”(XDA19050403))

表1 植物科学领域近三年论文关键词 Top20

序号	关键词	翻译	词频
1	photosynthesis	光合作用	1337
2	phylogeny	系统发生	947
3	gene expression	基因表达	926
4	drought	干旱	911
5	abiotic stress	非生物胁迫	847
6	climate change	气候改变	786
7	genetic diversity	遗传多样性	741
8	new species	新物种	724
9	oxidative stress	氧化胁迫	641
10	transcriptome	转录组	633
11	salt stress	盐胁迫	630
12	yield	产量	573
13	drought stress	干旱胁迫	560
14	reactive oxygen species	活性氧	557
15	salinity	盐度	548
16	antioxidant	抗氧化剂	516
17	germination	种子萌发	513
18	auxin	生长素	503
19	biodiversity	生物多样性	497
20	RNA-seq	RNA 测序	495

注:文献来源于 Web of Science 核心合集中植物科学领域 2017—2019 年发表的所有经过同行评议的文献(类型为 review 和 article),累计 84 342 篇。关键词排序为去除语义过于宽泛的词(如 plant)及物种名称(如 *Arabidopsis*、rice)等词汇之后的排序。

粮食产量和环境变化的影响至关重要,人工光合效率的提高为能源问题的解决提供了有效途径。

作为专业性较强的学术领域,光合作用研究包含了大量科技术语。本文运用文献计量学和知识图谱的方法,基于 WOS 中高被引论文中的科技术语,对光合作用领域近三年的研究热点和前沿进行分析和探测,以辅助科研人员快速制定和调整科研方向,也为科研管理部门进行学科布局 and 战略选择提供决策依据和参考。

1 研究基础

1.1 研究工具及研究方法

本文利用了文献计量的方法,从年度发文量分析、论文被引频次分析、关键词词频分析、关键词共现分析等多个维度对光合作用领域的文献进行分析和挖掘,并基于 VOSviewer 软件进行可视化呈现。VOSviewer 是基于 JAVA 程序编写的,可以对知识领域进行分析与可视化的开源软件。其分析对象是科学文献,特别是利用了 WOS 的引文数据来进行交互式的可视化分析。本研究用到的文献计量可视化工具主要为 VOSviewer1.6.15 版本软件。

1.2 数据收集

数据来源选取 Web of Science 核心合集中光合作用研究领域近三年(2017—2019)的文献,检索式为:TS=(“photosynthesis” or “photosynthetic”),共有论文 25 835 篇。将过滤结果依据设置为领域中的高被引论文及领域中的热点论文^①,累计 491 篇,检索时间为 2020 年 10 月 14 日。

2 光合作用领域近三年文献计量分析

2.1 年度发文量分析

光合作用的研究有着悠久的历史,早在 1771 年,英国化学家约瑟夫·普里斯特利(J. Priestley)就通过密闭钟罩实验证明了植物可以“净化”空气,这是光合作用研究的开端。2000 年以来,光合作用领域发文量呈现持续增长态势,从 2000 年的 2995 篇增至 2019 年的 9441 篇,年均增长率为 6.23%。

2.2 高被引论文分析

论文被引频次能够在一定程度上反应论文的受关注程度,通过对领域内的高被引论文进行分析,可以揭示该研究领域的研究前沿和热点方向。表 2 列出了 Web of Science 核心合集中收录的光合作用领域近三年排名前 10 位的高被引论文。由表 2 可以看出,这 10 篇高被引论文全部与“光催化剂”的研究相关,说明“光催化剂”成为近年来光合作用领域关注的前沿方向。

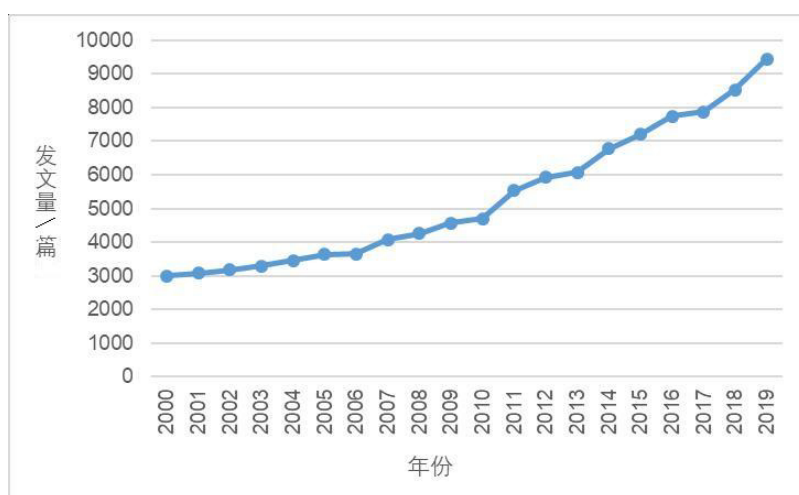


图1 光合作用领域年度发文章量分析

表2 光合作用领域近三年被引频次排名前10位的高被引论文

序号	标题	被引频次	年份	发表期刊
1	Earth-abundant Catalysts for Electrochemical and Photoelectrochemical Water Splitting	1105	2017	NATURE REVIEWS CHEMISTRY
2	A Review on g-C ₃ N ₄ -based Photocatalysts	1007	2017	APPLIED SURFACE SCIENCE
3	Alkali-assisted Synthesis of Nitrogen Deficient Graphitic Carbon Nitride with Tunable Band Structures for Efficient Visible-Light-Driven Hydrogen Evolution	558	2017	ADVANCED MATERIALS
4	Surface Modification and Enhanced Photocatalytic CO ₂ Reduction Performance of TiO ₂ : A Review	551	2017	APPLIED SURFACE SCIENCE
5	Metal-Free Photocatalyst for H ₂ Evolution in Visible to Near-Infrared Region: Black Phosphorus/Graphitic Carbon Nitride	437	2017	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY
6	Hierarchical Porous O-Doped g-C ₃ N ₄ with Enhanced Photocatalytic CO ₂ Reduction Activity	426	2017	SMALL
7	Photoelectrochemical Devices for Solar Water Splitting—Materials and Challenges	379	2017	CHEMICAL SOCIETY REVIEWS
8	Direct Z-scheme g-C ₃ N ₄ /WO ₃ Photocatalyst With Atomically Defined Junction for H ₂ Production	335	2017	APPLIED CATALYSIS ENVIRONMENTAL
9	A Direct Z-scheme g-C ₃ N ₄ /SnS ₂ Photocatalyst with Superior Visible-light CO ₂ Reduction Performance	334	2017	JOURNAL OF CATALYSIS
10	Direct Z-scheme Photocatalysts: Principles, Synthesis, and Applications	307	2018	MATERIALS TODAY

3 基于高被引论文及热点论文的光合作用领域文献聚类分析

3.1 关键词共现分析

共词分析方法利用文献集中词汇对或名词短语共同出现的情况,来确定该文献集所代表学科中各主题之间的关系。科技文献中出现的关键词绝大多数属于科技术语的范畴,共词分析方法可以有效分

析科技术语之间的共现关系。通过 VOSviewer 软件对光合研究领域近三年发表的高被引论文及热点论文中出现的关键词进行聚类分析。将 WOS 核心合集中光合作用领域 2017—2019 年发表文献的关键词按照词频排序,去除语义过于宽泛的词汇(如 plant 等)以及表述物种名称的词汇(如 *Arabidopsis* 等)后,选取共现频次高于 5 的关键词进行聚类分析(共 216 个词)得到如图 2 所示的聚类图谱。

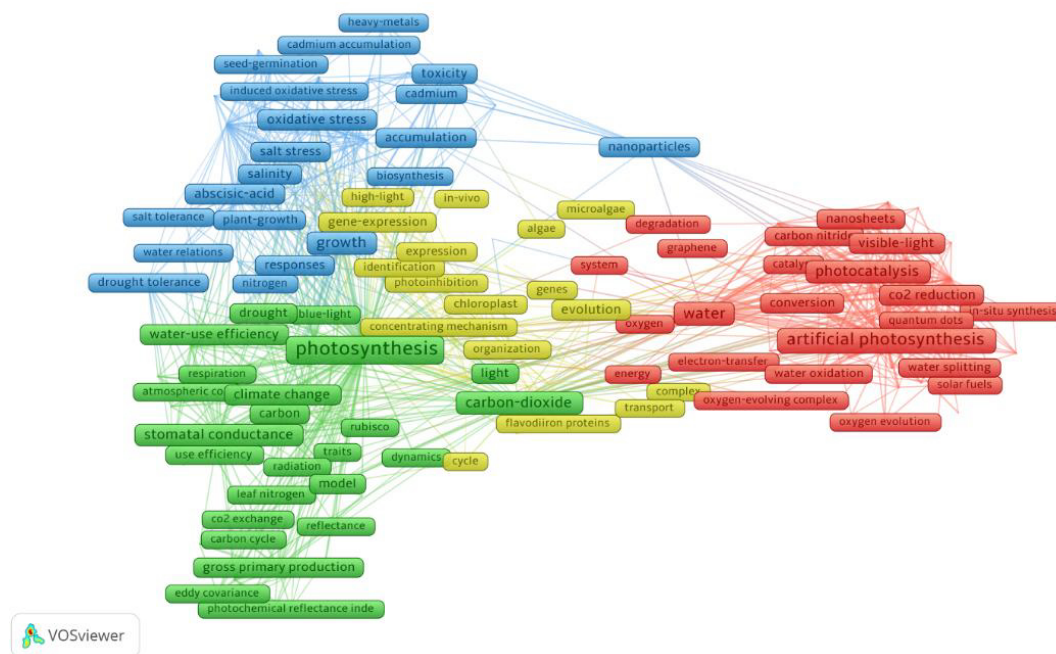


图 2 光合作用研究领域关键词共现图谱

由图 2 看出,根据关键词聚类,近三年光合作用研究热点集中于四个方向。聚类一(黄色)代表“光能的捕获、传递和转化”,聚类二(绿色)代表“气候变化对光合作用及碳循环的影响”,聚类三(蓝色)类簇代表“非生物胁迫与光合作用”,聚类四(红色)代表“人工光合”。这里将各个类簇中关键词按照共现频次排序,选取排名前 30 位的关键词进行解析。

聚类一:光能的捕获、传递和转化根据表 3 中的关键词,聚类一主要涉及“光能的捕获、传递和转化过程中叶绿体基因表达调控研究及晶体结构解析”。

(1) 光能的捕获:光能的捕获是指一系列光合

色素分子吸收光能并传递到光合反应中心(P680, P700)的过程。放氧光合生物有两个光系统,分别是光系统 I(photosystem I,PSI)和光系统 II(photosystem II,PSII)。两个光系统都是由各自的核心复合物和外周的捕光蛋白复合物(light-harvesting complex,LHC)组成的多亚基蛋白-色素复合物。光能的捕获是光合作用原初反应的起点,绿色植物中光能的捕获主要依赖于光系统 I 和光系统 II 的核心天线系统以及外周天线系统。外周天线系统即类囊体膜上的捕光色素复合物(LHC),LHCI 是光系统 I 的外周天线,LHCII 是光系统 II 的外周天线。此外,在状态转换过程中,LHCII 可以从光系统 II 移动到光系统 I 来平衡光系统之间的捕光能

表3 “光能的捕获、传递和转化”方向共现频率排名前30位的关键词

关键词	中文翻译	共现频率	关联强度
photosystem-II	光系统 II	35	137
gene-expression	基因表达	16	70
protein	蛋白	13	48
chloroplast	叶绿体	12	50
expression	表达	11	46
gene	基因	11	41
crystal-structure	晶体结构	10	28
photoinhibition	光抑制	8	52
identification	识别	8	40
C-4 photosynthesis	C-4 植物光合作用	8	31
photosynthetic electron-transport	光合电子传递	8	24
acclimation	适应环境、气候	7	42
photosystem-I	光系统 I	7	32
transport	转运	7	24
reactive oxygen species	活性氧	6	49
singlet oxygen	单线态氧	6	30
cycle	循环	6	24
energy-transfer	能量传递	6	20
fluorescence	荧光	6	15
ascorbate peroxidase	抗坏血酸过氧化物酶	5	27
flavodiiron proteins	FDP 蛋白	5	24
flucuating light	波动的光	5	23
water-water cycle	水-水循环	5	22
energy-balance	能量平衡	5	22
complex	复合物	5	18
high-light	高光	5	18
concentrating mechanism	浓缩机制	5	18
in-vivo	体内	5	17
dehydrogenase-like complex	脱氢酶复合物	5	13
light-harvesting complex	捕光色素复合物	5	12

力^[9]。高光下, LHCII 可以耗散掉多余的光能, 在光保护过程中发挥作用。

(2) 光能的传递: 光合电子传递链是指类囊体膜上由一系列相互衔接的电子传递体组成的电子传递总轨道。主要的电子传递途径是由希尔等人于 1960 年提出并经后人修正的“Z 方案”(Z scheme), 即 H₂O 的光解产生的电子, 经过 PSII 复合体、Cytb6f 复合体传递到 PSI 复合体, 产生 NADPH 和 H⁺, 使电子传递链呈侧写的“Z”字形。此外, 还有环式电子传递链和假环式电子传递链两种电子传递方式。

(3) 光能的转化: 叶绿体在光合电子传递的同时, 通过光合磷酸化过程使 ADP 和 Pi 形成 ATP, 为后续的暗反应阶段提供还原力。当光量子强度大于光量子的利用量时, 光能不能够被植物完全吸收, 且多余的光量子会对叶片产生破坏, 导致光合效率下降, 产生光抑制(photoinhibition)。对于多余的光量子, 植物体内有两道防线, 第一道防线是阻抑机制, 即将多余的光能以热的形式耗散掉; 第二道防线是清除机制, 即通过抗氧化酶系统、类胡萝卜素等清除活性氧(包括单线态氧和过氧化氢)等光的有毒产物。

暗反应阶段, 利用光反应阶段生成的 ATP, 通过卡尔文循环固定 CO₂, 最后生成储存能量的有机物, 不仅为地球上的生物提供食物来源, 也调控了大气中 CO₂ 浓度。C3 植物只有 1 次 CO₂ 固定(通过 RuBP 羧化酶), C4 植物有 2 次 CO₂ 固定(通过 PEP 羧化酶和 RuBP 羧化酶)。PEP 羧化酶对 CO₂ 亲和力很高, 通过 C4 途径转移 CO₂, 使鞘细胞 CO₂ 浓度比空气中高 20 倍左右, 起 CO₂ 泵的作用。所以, 一般情况下, C4 植物的 CO₂ 同化速率显著高于 C3 植物, 因此 C4 植物在碳循环中起着非常重要的作用, 在大气中 CO₂ 浓度升高的当下, C4 植物光合作用尤为引人注目。

蛋白结构是生理功能的内在基础, 晶体结构的解析是理解光能捕获、传递和转化的结构基础的关键。结构的解析可以帮助我们认识光合作用的工作原理, 从而更好地利用光合作用解决人类面临的粮食、能源、环境等问题。近年来, 随着冷冻电镜技

表4 “气候变化对光合作用及碳循环的影响”
方向共现频率排名前30位的关键词

关键词	中文翻译	共现 频率	关联 强度
photosynthesis	光合作用	109	487
carbon-dioxide	二氧化碳	36	175
chlorophyll fluorescence	叶绿素荧光	28	144
stomatal conductance	气孔导度	26	140
climate change	气候变化	24	94
water-use efficiency	水分利用率	21	101
gas-exchange	气体交换	20	102
gross primary production	总初级生产力	15	80
drought	干旱	15	72
temperature	温度	15	70
light	光	15	68
mesophyll conductance	叶肉导度	14	71
leaves	叶片	13	57
carbon	碳	13	55
CO ₂ assimilation	CO ₂ 同化	12	65
light use efficiency	光能利用率	11	59
electron-transport	电子传递	10	48
photosynthetic capacity	光合能力	10	48
use efficiency	利用率	9	46
carbon cycle	碳循环	8	47
elevated CO ₂	上升的 CO ₂	8	35
climate	气候	8	22
yield	产量	7	39
atmospheric CO ₂	大气中 CO ₂	7	37
leaf-area index	叶面积指数	7	37
transpiration	蒸腾	7	36
induced chlorophyll fluorescence	诱导叶绿素荧光	7	35
rubisco	核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶	6	34
eddy covariance	涡流协方差	6	33
productivity	产量	6	33

术的发展,光合蛋白复合物的结构不断得到解析。

聚类二: 气候变化对光合作用及碳循环的影响

工业革命以来,大气中 CO₂ 浓度从 280ppm 上升到 410ppm^[10],增加了 45%,导致截至 2017 年全球平均气温上升了 0.8°C^[11]。较高的温度不仅会改变植物的热环境,而且随着蒸散动力的增加,未来的大气可能会变得更加干燥^[12]。植被作为陆地生态系统碳库的主要成员,通过与土壤(陆地生态系统碳库的第二大成员)、大气(大气碳库)交互构成了完整的陆地生态系统碳循环^[13]。

光合作用是 CO₂ 从大气中进入生物圈的唯一途径,要准确地预测气候条件的变化对植物生产力的影响,依赖于对控制光合作用的机制的正确理解。光合作用直接或间接地与气候条件密切相关。在 C₃ 植物中,Rubisco 对二氧化碳的固定是光合 CO₂ 同化的第一步,而在正常细胞间 CO₂ 浓度下,Rubisco 活性远没有被 CO₂ 饱和。CO₂ 和 O₂ 竞争 Rubisco 的活性位点,CO₂ 含量的增加有利于羧化作用,不利于氧化作用。气候变化对光合作用的间接影响更为重要。当植物体内水分低于临界值时,植物会通过关闭气孔来减少体内水分的流失,这同时也限制了作为光合作用原料的 CO₂ 进入^[14]。预计 CO₂ 浓度的升高会增加叶片的光合速率,但这实际发生的程度尚不清楚,因为 CO₂ 对光合作用的刺激取决于叶片温度、水分和养分的可利用性^[15-16]。

聚类三: 非生物胁迫与光合作用

一方面,各种非生物胁迫环境降低了植物的光合作用能力。在非生物胁迫条件下,光合作用发生光抑制,产生有害的活性氧,威胁植物的健康和生存。胁迫还会影响光能利用率、降低色素水平、破坏叶绿体特别是光系统的结构。光合作用的暗反应是由酶所催化的一系列化学反应,而温度可直接影响酶的活性^[17]。光合作用对高温胁迫高度敏感,通常在其他细胞功能受损之前就被抑制^[18]。高温导致叶绿素合成减少,降解加速,类囊体膜解垛和膜脂组成的改变,光系统 II 损伤,Mn 簇瓦解,光合作用相关的酶活性降低甚至失活^[17,19]。干旱和盐胁迫对于光合作用的影响有直接的(由于

表5 “非生物胁迫与光合作用”方向
共现频率排名前30位的关键词

关键词	中文翻译	共现 频率	关联 强度
growth	生长	38	157
oxidative stress	氧化损伤	22	119
abscisic-acid	脱落酸	19	99
abiotic stress	非生物胁迫	18	95
antioxidant	抗氧化剂	17	107
salt stress	盐胁迫	17	98
hydrogen-peroxide	过氧化氢	16	103
salinity	盐度	15	83
water-stress	水分胁迫	15	80
accumulation	积累	14	82
toxicity	毒性	13	73
drought stress	干旱胁迫	12	67
plant-growth	植物生长	12	56
cadmium	镉	10	65
drought tolerance	抗旱	10	47
superoxide-dismutase	超氧化物歧化酶	8	65
seed-germination	种子萌发	8	46
leaf senescence	叶片衰老	8	45
tolerance	抗性	8	40
induced oxidative stress	诱导氧化应激	8	34
melatonin	褪黑素	7	48
heat stress	热胁迫	7	41
salicylic-acid	水杨酸	7	37
water-deficit	缺水	7	37
nitrogen	氮	7	32
stress	胁迫	7	32
osmotic adjustment	渗透调节	7	30
biosynthesis	生物合成	7	30
proline	脯氨酸	6	32
reactive oxygen	活性氧	6	31

表6 “人工光合”方向共现频率排名前30位的关键词

关键词	中文翻译	共现 频率	关联 强度
artificial photosynthesis	人工光合	71	320
water	水	42	213
photocatalysis	光催化	33	173
carbon nitride	氮化碳	26	143
graphitic carbon nitride	石墨相氮化碳	26	143
hydrogen evolution	放氢	26	135
CO ₂ reduction	CO ₂ 还原	21	100
reduction	还原	21	100
visible-light	可见光	20	96
hydrogen-production	产氢	16	67
nanosheets	纳米片层	14	84
z-scheme	z型电子传递链	12	65
TiO ₂	二氧化钛	12	62
water oxidation	水氧化	12	61
charge separation	电荷分离	11	47
visible-light irradiation	可见光照射	11	46
metal-organic frame-works	金属-有机物框架	10	53
highly efficient	高效的	10	51
water splitting	水裂解	10	50
g-C ₃ N ₄	石墨相氮化碳	9	56
oxidation	氧化	9	44
reduced graphene oxide	还原氧化石墨烯	9	40
anatase TiO ₂	锐钛矿二氧化钛	8	39
catalyst	催化剂	8	39
electrochemical reduction	电化学还原	8	31
graphene	石墨烯	7	43
graphene oxide	氧化石墨烯	7	43
photocatalytic CO ₂ reduction	光催化CO ₂ 还原	7	41
solar fuels	太阳能燃料	7	38
electron-transfer	电子传递	7	31

词出现的平均年份,颜色越蓝表示关键词出现的时间越早,越红说明关键词出现的时间越晚。由图3看出,光合作用领域近三年来大多数关键词出现时间集中于2018年。titanium-dioxide、g-C₃N₄、nono-crystals、quantum dots、hydrogen-production、composite photocatalysts 等词出现于2017年,表明人工光合相关研究在2017年热度最高。photoinhibition、silicon、antioxidant、drought tolerance、atmospheric CO₂、CO₂ assimilation、conductance、thermal-acclima-

tion、primary productivity、leaf-area index 等词出现于2019年,表明气候变化导致大气中CO₂浓度的增加对光合作用造成的影响越来越受到重视。

3.3 关键词密度分析

VOSviewer 密度视图可以通过关键词密度展示某个研究领域的研究重点和热点。由图4可以看出,气候变化对光合作用及碳循环的影响、人工光合、非生物胁迫与光合作用是近三年来光合作用领域最受关注的研究方向。

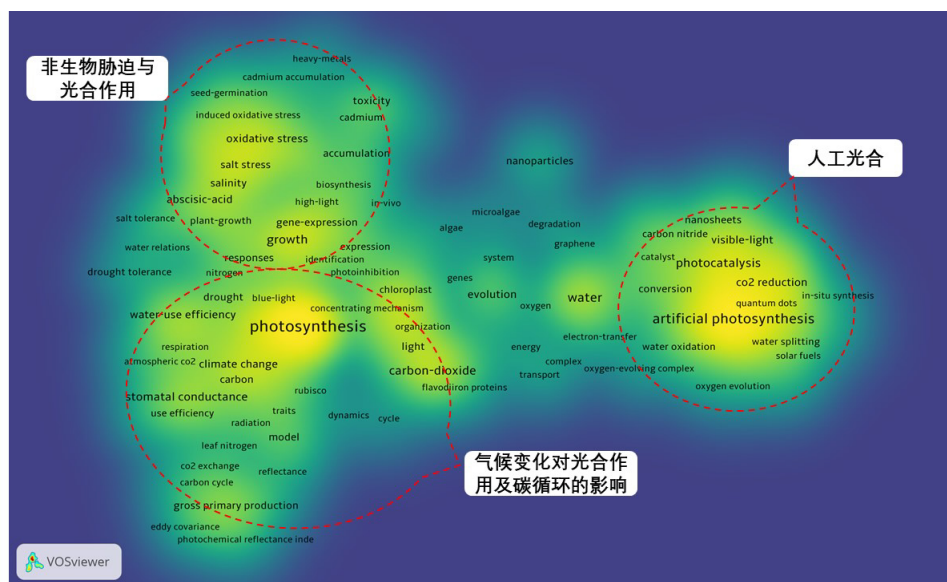


图4 光合作用领域关键词密度图

4 总结与讨论

科技术语是反映学科研究内容的基本要素,高被引论文是反应学科领域研究前沿和热点的重要载体。本文利用文献计量的方法,结合 VOSviewer 软件,对光合作用领域近三年发表的高被引论文中的科技术语进行分析、聚类 and 可视化呈现,得出如下结论:

一、近年来光合作用的研究热点集中于三个方面:一是自然光合作用的机理探究,如聚类一“光能的捕获、传递和转化”;二是光合作用与环境变化,包括聚类二“气候变化对光合作用及碳循环的影响”和聚类三“非生物胁迫与光合作用”;三是人工光合的应用和发展,即聚类四“人工光合”。近年来,国际上

权威的光合作用会议主题聚焦的热点也涵盖了这些研究方向,如2018年首届亚洲-太平洋光合作用大会^[24]、2019年光合作用戈登研究会议^[25],以及2022年即将举办的国际光合作用大会^[26]。

二、人工光合作用有望成为解决全球气候变化、能量和食物安全问题的有效途径。人工光合相关研究在2017年热度最高。自然光合作用的催化剂是酶,而人工光合作用的光催化剂是半导体材料,高性能光催化剂的研发和制备是提高人工光合效率的关键,因此“光催化剂”成为近年来光合作用研究的前沿,这一点从被引频次排名前10位的高被引论文也可以看出。此外,气候变化导致大气中CO₂浓度的增加对光合作用造成的影响越来越受到重视。

三、光合作用领域近三年发表的高被引论文的高频关键词中,有12个关键词也出现在植物科学领域近三年发表论文的排名前20位的关键词中,包括 photosynthesis、gene expression、drought、abiotic stress、climate change、oxidative stress、salt stress、yield、drought stress、reactive oxygen species、salinity、antioxidant。表明近三年光合作用的热点研究方向同时也是整个植物科学领域关注的重点,也进一步说明了光合作用研究在整个植物科学领域的重要性日益突出。

从术语的角度能够对学科发展态势的分析起到一定的辅助作用,能够一定程度上揭示相关发现,本文通过分析光合作用领域高被引论文中包含的科技术语的频次、共现关系以及随时间的演化情况,揭示光合作用领域近年来的研究前沿和热点。

本研究选取的文献来自 Web of Science 核心合集,基于英文文献对国际光合作用研究态势进行了分析,缺乏对国内光合作用研究前沿和热点的分析和讨论,这是本研究的局限所在,在今后的研究中将结合 CNKI、维普、万方等中文平台的数据对国内光合作用研究态势进行进一步的研究。

注释

① 根据 ESI 指数(InCites Essential Science Indicators) 热点论文是指在过去两年内发表的,截至2020年7/8月内受到的引用的次数在本领域中最优秀的0.1%之列的论文。

参考文献

- [1] NICOLAISEN J. Bibliometrics and Citation Analysis: From the Science Citation Index to Cybermetrics [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2010, 61(1): 205-207.
- [2] ZHANG W, XU X L, MING C H, et al. Surviving in the Dispute: A Bibliometric Analysis of Global GMF-related Research, 1995-2014 [J]. Scientometrics, 2016, 109(1): 359-375.
- [3] ZHENG T L, WANG J, WANG Q H, et al. A Bibliometric Analysis of Micro/nano-bubble Related Research: Current Trends, Present Application, and

- Future Prospects [J]. Scientometrics, 2016, 109(1): 53-71.
- [4] 李晓曼, 张扬, 徐倩, 等. 基于文献计量的植物表型组学研究进展分析 [J]. 农业大数据学报, 2019, 1(2): 64-75.
- [5] 徐志周, 王茂丽, 张敏瑜, 等. 基于 SCI 收录的植物菌根信号文献计量分析 [J]. 浙江农业科学, 2019, 60(1): 167-171.
- [6] 王瑞. 基于文献计量分析的小麦科研实力国际比较研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [7] FRIEDLINGSTEIN P, COX P M, BETTS R A. Climate-carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison [J]. Journal of Climate, 2006, 19: 3337-3353.
- [8] HUNTINGFORD C, ZELAZOWSKI P, GALBRAITH D, et al. Simulated Resilience of Tropical Rainforests to CO₂-induced Climate Change [J]. Nature Geoscience, 2013, 6: 268-273.
- [9] FROMME P, GROTJOHANN I. Overview of Photosynthesis [M]. In: Fromme P. Photosynthetic Protein Complexes. WILEY-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008, 2.
- [10] CIAIS P, SABINE C, BALA G, et al. Carbon and other biogeochemical cycles [C]//TIGNOR M, ALLEN S K, BOSCHUNG J, et al. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 465-570.
- [11] DUSENGE M E, DUARTE A G, WAY D A. Plant Carbon Metabolism and Climate Change: Elevated CO₂ and Temperature Impacts on Photosynthesis, Photorespiration and Respiration [J]. New phytologist, 2019, 221: 32-49.
- [12] FICKLIN D L, NOVICK K A. Historic and Projected Changes in Vapor Pressure Deficit Suggest a Continental-scale Drying of the United States Atmosphere [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122: 2061-2079.
- [13] 车明亮, 陈报章, 王瑛, 等. 全球植被动力学模型研究综述 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 263-271.
- [14] KIRSCHBAUM M U F. Direct and Indirect Climate Change Effects on Photosynthesis and Transpiration [J].

- Plant Biology ,2004: 242–253.
- [15] LEAKEY A D B , AINSWORTH E A , BERNACCHI C J , et al. Elevated CO₂ Effects on Plant Carbon , Nitrogen , and Water Relations: Six Important Lessons from FACE [J]. Journal of Experimental Botany , 2009 , 60: 2859–2876.
- [16] ZHU P , ZHUANG Q , CIAIS P , et al. Elevated Atmospheric CO₂ Negatively Impacts Photosynthesis through Radiative Forcing and Physiology-mediated Climate Feedback [J]. Geophysical Research Letters , 2017 , 44: 1956–1963.
- [17] MATHUR S , AARAWAL D , JAJOO A. Photosynthesis: Response to High Temperature Stress [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology , 2014 , 137: 116–126.
- [18] BERRY J A , BJÖRKMAN O. Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants [J]. Annual Review of Plant Physiology , 1980 , 31: 491–543.
- [19] EFEOLU B , TERZIOGLU S. Photosynthetic Responses of Two Wheat Varieties to High Temperature [J]. Eurasian Journal of Biosciences , 2009 , 3: 97–106.
- [20] CHAVES M M , FLEXAS J , PINHEIRO C. Photosynthesis under Drought and Salt Stress: Regulation Mechanisms from Whole Plant to Cell [J]. Annals of Botany , 2009 , 103: 551–560.
- [21] GAN P , LIU F , LI R B , et al. Chloroplasts—Beyond Energy Capture and Carbon Fixation: Tuning of Photosynthesis in Response to Chilling Stress [J]. International Journal of Molecular Sciences , 2019 , 20: 5046.
- [22] DOGUTAN D K , NOCERA D G. Artificial Photosynthesis at Efficiencies Greatly Exceeding That of Natural Photosynthesis [J]. Accounts of Chemical Research , 2019 , 52(11) : 3143–3148.
- [23] YU H J , SHI R , ZHAO Y X , et al. Alkali-Assisted Synthesis of Nitrogen Deficient Graphitic Carbon Nitride with Tunable Band Structures for Efficient Visible-Light-Driven Hydrogen Evolution [J]. Advanced Materials , 2017 , 29(16) : 1–7.
- [24] 第一届亚洲-大洋洲光合作用国际会议(AOICP2018) 会议通知 [EB/OL]. [2020–12–13]. http://lab.ihb.cas.cn/xsjl/201807/t20180704_415130.html.
- [25] GRC. Photosynthesis. Gordon Research Conference. [EB/OL]. [2020–12–13]. <https://www.grc.org/photosynthesis-conference/2019>.
- [26] International Congress on Photosynthesis Research 2022 [EB/OL]. [2020–12–13]. <https://www.photosynthesis-research.org/ispr-news/asia-oceania/2019/international-congress-on-photosynthesis-research-2020>.



作者简介:

蒋甜(1988—),女,博士。中国科学院文献情报中心资源建设部馆员,从事科学数据管理、科技领域情报分析等相关研究工作,在《图书情报工作》《中国生物工程》、*Journal of Data and Information Science* 等期刊上发表论文。通信方式: jiangtian@mail.las.ac.cn。



通讯作者:许哲平(1980—),男,博士。中国科学院文献情报中心副研究馆员,《Data Intelligence》和《农业大数据学报》的编委,GBIF(全球生物多样性信息机构)亚洲地区副负责人,CODATA(国际科技数据委员会)工作组成员。长期从事科学数据资源的建设、管理和应用服务等工作,主要研究领域包括生物多样性、文献计量、数字图书馆、地质和数字人文等,主持和参与了科技部、中科院、中国科协创新战略研究院和各类委托项目20余项,在专业领域术语研究、数据组织加工、海量数据处理分析、GIS、数据可视化和知识图谱等方面有丰富经验,发表30多篇论文。通信方式: xuzp@mail.las.ac.cn。