

张 杨,朱 林,程云龙,等. 根系分泌物研究现状及趋势——基于 CiteSpace 的知识图谱分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(14):34-45.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.14.004

根系分泌物研究现状及趋势 ——基于 CiteSpace 的知识图谱分析

张 杨^{1,2}, 朱 林¹, 程云龙³, 荆庆芳¹, 兰 艳¹

(1. 宁夏大学生态环境学院/西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏银川 750021;

2. 甘肃省分析测试中心, 甘肃兰州 730000; 3. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021)

摘要:根系分泌物在调节土壤生态、根际微环境等方面具有重要作用。基于 2001—2021 年 CNKI(中国知网)数据库以及 Web of Science(WOS)核心文献数据库收录的根系分泌物中英文文献,借助文献信息可视化分析软件 CiteSpace 进行关键词聚类分析、文献共被引聚类分析及可视化图谱展现,对国内外有关根系分泌物的研究现状进行分析,旨在追踪研究热点及趋势,归纳主题演进,了解当前国际研究前沿。结果表明,系分泌物研究领域总发文量及引用次数均呈逐年递增趋势,国内外根系分泌物研究都经历了前期的探索和发展,中期的沉淀以及后期快速增长;中外学者在根系分泌物应用研究方面侧重点不同,各有所长,国内应用方向分支少,主要以农业生产作物种植为主;国外以土壤生态配合模型模拟应用到揭示森林等生态问题机制机理当中;根系分泌物国内未来研究和应用重点可能在于根系分泌物-土壤-根际微生物对农业的支撑,为我国推动农业可持续发展提供思路。国外未来研究和应用的重点可能在于根际-根系分泌物-环境的反应机制及其作用。

关键词:根系分泌物;CiteSpace;研究热点;研究趋势;可视化分析

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)14-0034-12

根系分泌物是植物根系向根际土壤环境释放的有机物质的总称,它决定植物与土壤环境相互作用的重要过程,可以显著改变根-土界面物理、化学和生物学特性^[1],也是保持根际微生态系统活力

的关键因素,还是根际物质循环的重要组成部分^[2]。18、19 世纪,Plenk 等发现根系分泌物对邻近植株有促生和抑制作用^[3]。由于植物自身特性根系分泌物不仅在不同种属植物间存在显著差异,且同种植物在不同的生长发育时期或生长环境下,根系分泌物组成和含量也会发生改变。当植物受光照、温度、土壤盐碱性、营养状况等胁迫条件下,根系分泌物的种类和数量在很大程度上体现出差异^[4]。根际微生物也是影响根系分泌物的一个因素。根系分泌物是根际微生物营养物质的主要来源,外界环境因素改变导致根系分泌物组成发生变化从而会影响根际微生物类群的结构。反之,根际

收稿日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金(编号:31860135);宁夏回族自治区农业育种专项(编号:2019NYYZ0401);宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(编号:NXYLXK2017B06);宁夏大学西部一流大学重点实验室建设专项(编号:GZXM2017001)。

作者简介:张 杨(1987—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,助理研究员,从事分析化学和植物生态学研究。E-mail:6398821@qq.com。

通信作者:朱 林,博士,研究员,从事植物水分生理和生态学研究。E-mail:zhulinscience@126.com。

367-377.

[111] Mohd H F W, Raoov M, Kamaruzaman S, et al. A rapid and efficient dispersive trehalose biosurfactant enhanced magnetic solid phase extraction for the sensitive determination of organophosphorus pesticides in cabbage (*Brassica olearaceae* var. *capitata*) samples by GC-FID[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 102: 104057.

[112] Jang J K, Li A. Separation of PCBs and PAHs in sediment samples using silica gel fractionation chromatography[J]. Chemosphere, 2001, 44(6): 1439-1445.

[113] Zhou Y Y, Yu J F, Yan Z G, et al. Application of portable gas chromatography-phot-ionization detector combined with headspace sampling for field analysis of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene in soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185: 3037-3048

[114] 陈梦华, 陈 峰. 南方某农药厂退役场地环境调查与污染特征分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(3): 149-151.

[115] 许 霞, 薛银刚, 刘 菲, 等. 废弃农药厂污染场地土壤浸出液的急性毒性和遗传毒性筛查[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(6): 223-232.

微生物类群的变化又对植物根系分泌物的组成和含量产生影响^[5]。直到 20 世纪 50 年代, Uselman 等开始认识到根系分泌物与固氮菌的互利关系时, 此领域的研究才日益被人们重视起来^[6]。此后对根系分泌物的研究逐渐展开, 由于当时测试手段和试验条件的限制, 起初有关分泌物研究方法的进展非常缓慢, 而随着分析测试技术、生物技术以及显微技术的广泛应用, 促使根系分泌物的研究发展迅速。由于传统文献无法全方面清晰地理清学科的发展动态, 且现有基于文献计量角度在根系分泌物领域中的分析相对较少。因此, 本研究基于 2001—2021 年 Web of Science(WOS)核心文献数据库以及 CNKI(中国知网)数据库收录的根系分泌物中英文文献, 以陈超美博士所研发的文献信息可视化分析软件 CiteSpace 为研究工具^[7], 针对根系分泌物研究领域的工作进行文献计量初步分析, 归纳目前该领域的研究现状, 以明晰其研究主题、发展历程, 追踪研究热点及趋势, 以期为该领域科技工作者提供参考, 同时也启发实际应用研究找到切入点。

1 研究方法数据来源

科学知识图谱是以知识域为对象, 展示科学知识发展进程与结构关系的一种可视化的知识图形, 通过融合关键词等知识单元的不同节点, 经过内部算法筛选后进行呈现展示知识群之间的网络、结构、演化等复杂关系^[8]。CiteSpace 是一个免费的工具, 由美国德雷塞尔大学陈超美教授开发, 用于对一个科学领域的发展进行交互式和探索性分析, 范围从一个专业到多个相关的科学前沿^[9]。将 CiteSpace 应用于本研究的数据处理, 以交互式视觉功能分析展示根系分泌物的研究现状、研究热点和趋势。

文献数据主要来自中国期刊全文数据库 CNKI 和 Web of Science(WOS)数据库, 数据检索采集于 2021 年 6 月 30 日。其中中文文献数据选自 CNKI 数据库, 包括学术期刊、学位论文和会议论文。在高级检索模式下主题词为“根系分泌物”, 选取网络首发、增强出版、基金文献、中英文扩展, 时间范围为 2001 年 1 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日, 共检索到 1 292 篇文献, 将其以 refworks 格式导出, 数据信息包括作者、摘要、关键词等。选择 CiteSpace “keyword”进行关键词聚类共现分析, 并生成可视化图谱。另外 CiteSpace 软件暂不能对 CNKI 数据库

导出信息进行共被引聚类分析, 故不作分析。外文数据选自 WOS 数据库核心合集, 索引: SCI - EXPANDED、SSCI、A&HCL、CPCI - S、CPCI - SSH、ESCI、CCR - EXPANDED、IC, 检索主题为 TS = (“root exudation”), 时间跨度为 2001—2021 年, 共检索到 1 102 篇文献。在 CiteSpace 中选择“keywords”进行关键词聚类共现分析、选择“reference”进行共被引聚类分析, 并生成可视化图谱。

2 国内根系分泌物研究进展

2.1 文献计量分析

基于 CNKI 检索的数据计量分析, 得到根系分泌物主题相关文献发表年度趋势图, 可见根系分泌物基础研究与应用技术呈现波动式逐渐攀升的态势(图 1)。从发展趋势结果来看, 2001—2021 年根系分泌物的研究可分为 3 个发展阶段。2001—2007 年发文量逐渐上升, 2005 年约是 2001 年的 3 倍, 可见这 5 年相关研究逐渐变热。而 2006 年较 2005 年有所回落, 且 2007 没有相关论文发表。经过 2 年的研究热度回落, 研究者又发现根系分泌物研究的诸多科学问题, 也意识到其应用前景^[10,11]。因此, 2008—2016 年发文量递增到 2016 年 114 篇的峰值, 这 9 年间根系分泌物的研究发展平稳迅速, 为后期研究工作积累了许多基础和经验。2017—2021 年 6 月末发文数量的变化趋势呈“S”形, 稍有波动, 由于根系分泌物的研究涉及多个交叉学科, 且收集和提取过程繁琐, 分析时需要用到多种大型仪器^[12], 因此获取数据受到限制, 这可能是不稳定波动的因素之一。然而根系分泌物依旧有诸多问题需要探索, 未来的相关研究仍会回暖递增。

依据 CNKI 数据库文献学科类别统计分析见表 1, 可见前 10 位中发文数量最多的是农作物类, 占比达 21.68%, 其后是园艺和农业基础科学, 占比分别为 15.13%、12.84%, 生物学、植物保护、农艺学 3 类学科占比接近, 表明国内学者对根系分泌物的热点研究主要集中在农学和农作物应用上。而环境科学与资源利用、林业、自然地理学和测绘学方向的文献占比较小, 反映国内学者在这 3 类学科中根系分泌物的相关研究较少, 他们更倾向于将着力点放在根系分泌物对农业生产的提高和对植物的影响^[13]。最少的学科类别是化学, 仅占 0.48%, 未来在分析化学或植物化学角度出发对根系分泌物进行探索, 将会为其提供更多研究途径和思路。

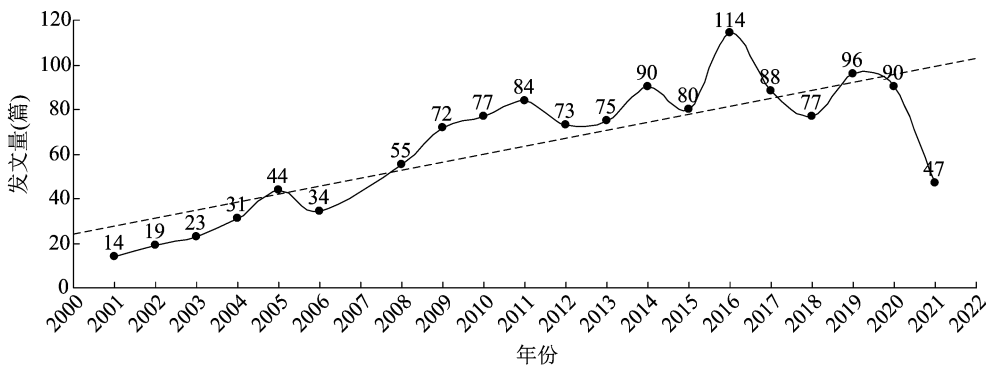


图1 2001—2021 年 CNKI 数据库根系分泌物研究发文数量

表 1 根系分泌物研究学科类别信息

序号	发文数量 (篇)	占比 (%)	学科类别
1	407	21.68	农作物
2	284	15.13	园艺
3	241	12.84	农业基础科学
4	225	11.99	生物学
5	221	11.77	植物保护
6	198	10.55	农艺学
7	178	9.48	环境科学与资源利用
8	91	4.85	林业
9	23	1.23	自然地理学和测绘学
10	9	0.48	化学

2.2 关键词分析

2.2.1 关键词研究热点共现分析 由图 2、表 2、表 3 可知,从农业种植模式看,不同作物研究一直是国内根系分泌物关注的重点,而与根系分泌物紧密相关的根际效应^[14]、化感作用^[15]、土壤环境^[16]等方向的研究仅在 2001—2007 年表现出热度。2008—2016 年,各类蔬菜瓜果以及农作物研究依旧突显^[17],而微生物^[18]、根际土壤^[19]、化学成分^[20]等根系分泌物交叉学科多点爆发,可以说是百花齐放。2017—2021 年,王亚君等开始重视种植模式和根系分泌物的关系^[13],以及土壤化学^[21]、生物学^[22]、微

生物学与根系分泌物的交叉学科问题^[23]。从关键词热点来看,农业科学研究总体占比较大,而与之相联系的土壤化学、植物化学、生物学研究频次和突发强度都表现较弱。虽然根系分泌物的研究在我国不断发展,但仍应继续在多学科交叉领域寻找新的突破点和应用方向。

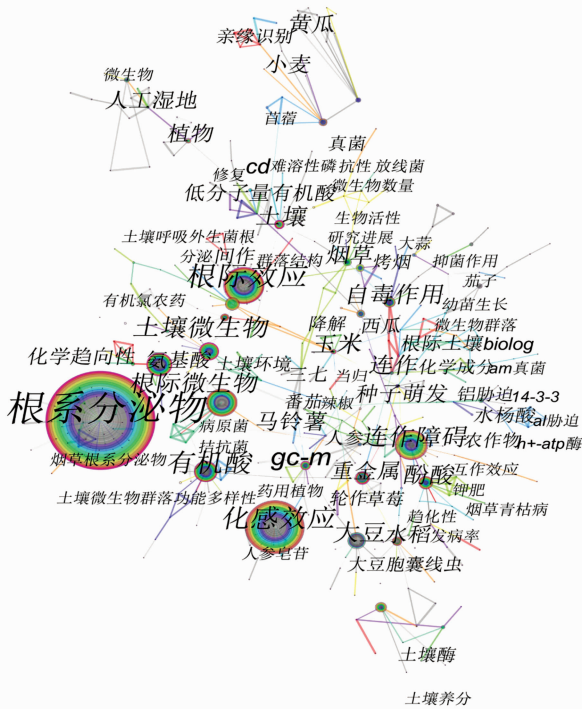


图2 根系分泌物研究关键词共现图谱

表 2 不同时期高频和具有中心性的关键词信息

年份	关键词(频次/中心性)
2001—2007	根系分泌物(795/0.43);化感效应(233/0.09);根际效应(123/0.2);有机酸(79/0.16);连作(22/0.19);植物修复(35/0.02)连作障碍(97/0.11);土壤(27/0.37);小麦(28/0.13)
2008—2016	西瓜(20/0.07);微生物(15/0.02);自毒作用(34/0.12);种子萌发(16/0.15);根际土壤(11/0.11)降解(8/0.1);水杨酸(5/0.04);间作(30/0.05);化学成分(8/0.04);轮作(9/0.06)微生物多样性(5/0.01)
2017—2021	土壤理化性质(4/0.07);分离鉴定(2/0.01);生物活性(2/0.01);细菌(3/0.03);真菌(2/0.03);机制(2/0.01);兰州百合(2/0.01)

表 3 突发性关键词信息

关键词	强度	起始年份	结束年份	时间段
大豆	7.65	2001	2009	■
间作	7.33	2016	2021	■
茄子	6.25	2009	2011	■
小麦	5.44	2010	2014	■
大蒜	4.10	2011	2014	■
黄瓜	4.06	2010	2013	■
土壤环境	3.94	2001	2007	■
综述	3.66	2012	2014	■
烤烟	3.63	2012	2015	■
化学成分	3.41	2015	2018	■
轮作	3.23	2016	2021	■
嫁接	3.15	2008	2011	■

注: ■表示关键词出现频次无显著变化的年份; ■表示关键词出现频次出现显著变化(突然增加)的年份。

2.2.2 关键词聚类分析 用中文文献关键词聚类分析(表4)和聚类时间线可视化展示(图3)得到10类较明显的聚类信息,其中节点数569,连线702条。 Q 值=0.884 1(Q 值域为[0,1], $Q>0.3$ 则表示可视化结构显著),平均轮廓值 $S=0.9714$ ($S>0.5$ 则表示聚类结果可信),轮廓值是衡量一个聚类内成员相似度的指标,数值越大,代表聚类成员具有较高的同质性。由表4可知,#0(根系分泌物)和#1(茄子)聚类大小相近,主要讨论了包含关键词根系分泌物、茄子^[24]的相关研究,以及种植方式、土壤和微生物群落之间的关系^[25]。由图3可知,2001年#0聚类开始出现且当年的研究成果较多,此后该聚类关注度平稳并一直持续到2021年,表明该领域的学者一直在坚持探索,但突破性进展较小。#1聚类刚开始出现时关注度趋冷,直到2009年表现出热度,此后都有研究持续关注,推测学者们在茄子等农业种植中发现了应用前景。#2(化感作用)、#3(外生菌根)、#4(有机氯农药)、#5(间作)这4项聚类大小相近,主要讨论植物化感作用与土壤微生物、土壤化学性质^[26],交互作用和种植方式之间的科学问题^[27]。由图3可知,#2、#3聚类在2001年出现时成果明显,2003、2004年相关研究也有热度显现,至今化感作用关注度平稳而外生菌根趋冷。#4聚类自2001年出现以来表现短暂热度此后关注度明显降低。#5聚类在2003年开始有一小部分成果直到2014年成果才表现突出,说明关注度在增加,研究成果也在提升。#2~#5聚类充分展现了我国科研工作者研究思路的广泛和领域间的交叉。#6

(大豆)、#7(烟草)、#8(有机酸)、#9(小麦)等4项聚类大小相近,讨论不同农作物根系生理特性与微生物以及根系分泌物有机酸之间的相互作用^[28-29],学者们试图通过不同途径揭示机理机制,同时也希望能有生物方面的应用。由图3还可知,#8聚类开始出现时间最早,成果也在一开始表现突出,之后关注度逐渐趋冷。#6、#7、#9等3项聚类分别在2004、2006、2011年开始时成果较小,而关注度至今稳定。因此,可以在有应用价值的植物中继续跟进研究根系分泌物组成、含量和分子机理等科学问题^[30-31],有助于阐明根系分泌物与土壤、根际微生物之间的互馈作用^[32],以便为根系分泌物应用奠定理论基础。

3 国际根系分泌物研究进展

3.1 文献计量分析

基于WOS导出数据的计量分析,得到年发文数量变化趋势(图4),可见国外root exudation应用与研究呈现稳定的波动式攀升态势。从发展趋势来看,2001—2021年root exudation的研究可划分为3个时段来分析。2001—2009年每年发文数量基本保持平稳,可以看作国外学者们在进行不同领域的探索。2010—2015年,个别年份发文数量略有回落,整体趋势降低,预示着研究有转折可能遇到了新的问题。进入2016—2021年6月末发文量大量增加,从转折点变为增长趋势,研究成果较多,有了前期研究基础的铺垫和分析检测技术进步,推动了后期研究的迅速成长,使研究进入快速发展期。

表 4 关键词聚类信息

聚类编号及名称	大小 (节点数)	平均轮廓值	突现词(对数似然比, <i>P</i> 值)
#0 根系分泌物	57	1.000	根系分泌物(82.36,0.000 1);连作障碍(9.47,0.005);根际土壤(5.54,0.05);土壤微生物(2.69,0.5);提取方法(2.61,0.5)
#1 茄子	49	0.965	茄子(40.66,0.000 1);自毒作用(27.19,0.000 1);连作(17.65,0.000 1);微生物群落(17.06,0.000 1);化学成分(12.52,0.001);释放途径(11.55,0.001);磷脂脂肪酸(5.77,0.05);交互调控(2.74,0.1)
#2 化感作用	36	0.972	化感作用(79.11,0.000 1);GC/MS(56.8,0.000 1);有机酸(10.22,0.000 1);收集方法(8.77,0.005);根际效应(5.89,0.05);土壤微生物(5.68,0.05);交互调控(5.65,0.05);生理性状(4.38,0.05)
#3 外生菌根	33	0.983	外生菌根(66,0.000 1);土壤化学性质(61.16,0.000 1);土壤微生物(30.05,0.000 1) 分泌(10.63,0.000 1);根系(9.69,0.005);化学信号(5.31,0.05);脯氨酸(5.31,0.05);交互调控(3.48,0.1);生理机制(1.78,0.5)
#4 有机氯农药	30	0.966	有机氯农药(36.67,0.000 1);土壤微生物(32.08,0.000 1);土壤理化性质(19.49,0.000 1);群落结构(13.87,0.001);土壤生物学环境(6.08,0.05);有机酸(4.24,0.05);交互调控(2.35,0.5)
#5 间作	30	0.973	间作(49.97,0.000 1);玉米(28.75,0.000 1);蚕豆(21.72,0.000 1);土壤酶活性(17.9,0.000 1);保水剂(11.92,0.001);植物修复(8.76,0.005);稗草(5.95,0.05);氨基酸(4.41,0.05);根际互作(3.28,0.1);光合特性(1.77,0.5)
#6 大豆	28	0.942	大豆(55.48,0.000 1);大豆胞囊线虫(35.45,0.000 1);水稻(15.27,0.000 1);抗性机制(12.72,0.001);根系生理特性(6.35,0.05);生物防控(1.09,0.5);
#7 烟草	26	0.920	烟草(24.68,0.000 1);抗性(16.18,0.000 1);真菌(16.18,0.000 1);细菌(16.18,0.000 1);有益菌(0.46,0.5)
#8 有机酸	25	0.973	有机酸(73.17,0.000 1);重金属(40.08,0.000 1);作用机制(11.63,0.001);丛枝菌根(11.63,0.001);磷(5.81,0.05);分子机理(5.81,0.05);低钾胁迫(1.65,0.5)
#9 小麦	25	1.000	小麦(53.62,0.000 1);黄瓜(34.23,0.000 1);亲缘识别(14.69,0.001);苜蓿(10.92,0.001);渗透调节物质(7.33,0.01);LC-MS/MS(4.61,0.05);骆驼蓬(0.4,1.0);蜈蚣草(0.4,1.0)

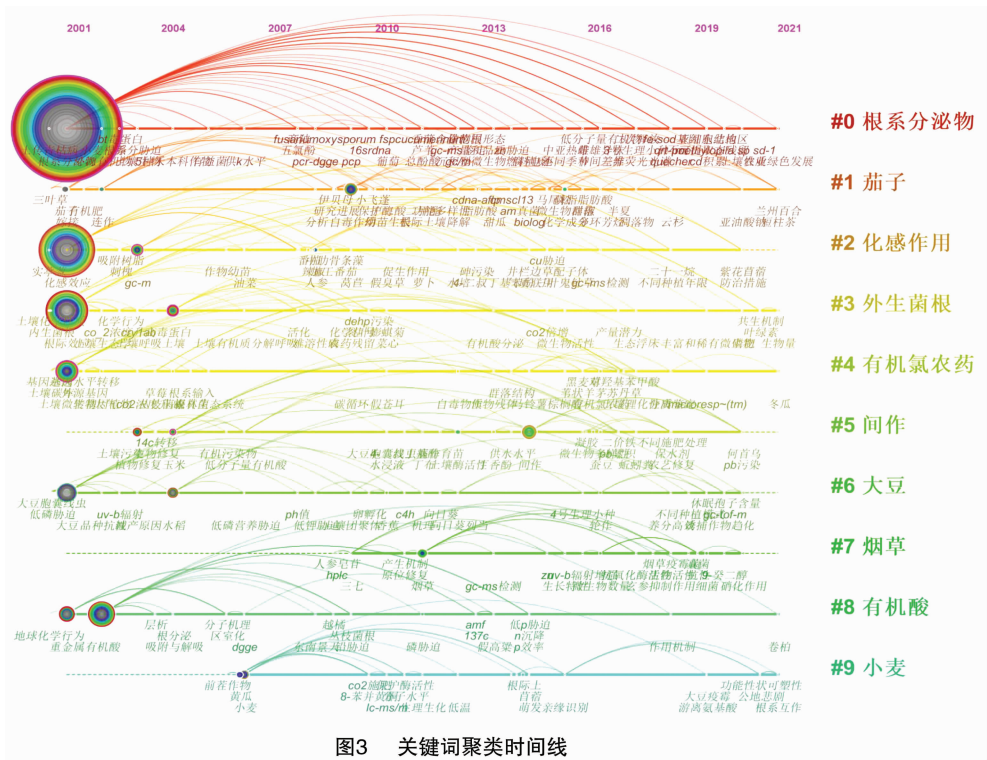


图3 关键词聚类时间线

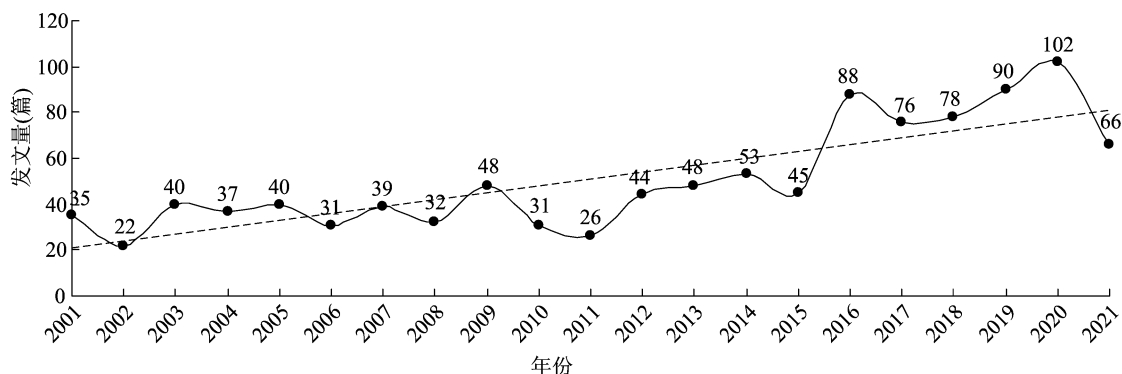


图4 WOS 核心合集 root exudation 研究发文量

由表 5 可知,发文数量较多的是 agriculture、plant sciences 和 environmental sciences ecology,前三名学科类别交叉联系紧密,这与 root exudation 研究初衷是相同的,就是利用 root exudation 的各类指标更全面地分析农业、植物与生态环境之间的关系^[33],以及帮助提升农业产量和经济的增长^[34-35]。之后,随着国外学者对 root exudation 研究关注度不断攀升,交叉学科研究不断深入,微生物学(microbiology)、生物化学与分子生物学(biochemistry molecular biology)、科学技术其他主题(science technology other topics)、化学(chemistry)等领域中与 root exudation 研究联系紧密的也逐步增多,侧面反映 root exudation 研究角度多样、基础和应用问题广泛、有趣。

表 5 root exudation 研究领域学科类别信息

序号	发文数量 (篇)	占比 (%)	领域类别
1	467	42.38	agriculture
2	448	40.65	plant sciences
3	274	24.86	environmental sciences ecology
4	58	5.26	microbiology
5	44	3.99	biochemistry molecular biology
6	43	3.90	science technology other topics
7	42	3.81	chemistry
8	30	2.72	biotechnology applied microbiology
9	29	2.63	forestry
10	28	2.54	geology

3.2 关键词分析

3.2.1 关键词研究热点共现分析 由图 5、表 6、表 7 可知,root exudation 研究发展 21 年来,以根系分泌物、农作物、微生物群落为主要研究方向,而土壤化学、生态学以及逆境胁迫影响是其相关的交叉研究内容。2001—2009 年研究主要围绕根系分泌

物^[36]、植物^[37]、土壤^[38]、微生物^[39]等,根系分泌物(root exudation)、植物(plant)、土壤(soil)等与 root exudation 本身紧密相关的关键词出现频次较高;其次是有機酸(organic acid)、微生物群落(microbial community)、累积(accumulation)这些则反映了 root exudation 研究的主要指标或内容,即通过简单直观的研究内容分析其与植物、微生物、生态之间的关系和作用,为农业应用提供指导。最后,一些植物和生态的基础研究方向逐渐开展起来。如微生物(microorganism)、玉米(maize)、CO₂ 增加(elevated CO₂)、拟南芥(arabidopsis thaliana)、落叶层(leaf litter)、气候变化(climate change)等。2010—2015 年,国际学者开始集中在植物生长(plant growth)、微生物群落结构(microbial community structure)、酶活性(enzyme activity)、植物根际促生细菌(growth promoting rhizobacteria)等微观生物学领域,并积极

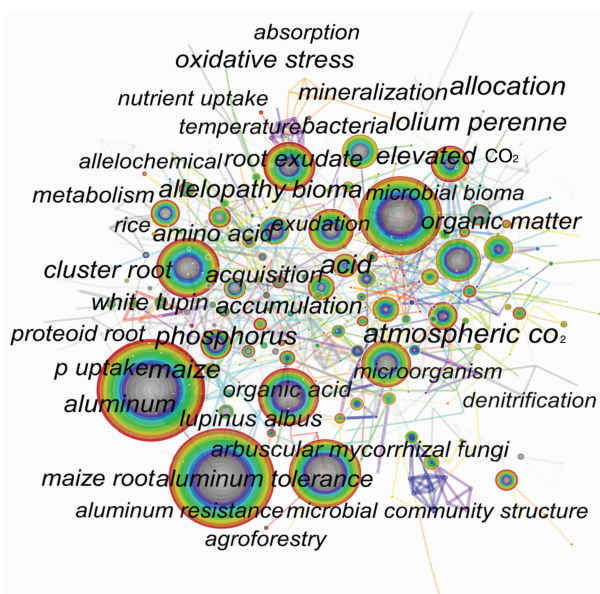


图5 root exudation 研究关键词共现图谱

探索 root exudation 应用^[40-41],以便利用微生物与植物根际的互利作用来提升植物自身生长,服务农业生产,同时可以从微生物这条研究途径对 root exudation 的分泌机制做出阐述。2016—2021 年,学者们开始在氮有效性^[42],干旱^[43],诱导系统抗性^[44]等植物耐逆性和植物化学相关的领域进行探究 root exudation 在植物生理或植物化学中的作用。值得注意的是,在 12 类突现词中,玉米 (*Zea mays*

L.)、黑麦草 (*Lolium perenne*)、微生物群落 (microbial community)、丛根群 (cluster root)、pH 值、铁 (iron) 等均与植物以及微生物有关,突现时间长,为长时热点,反映了 root exudation 研究的集中方向。此外,从突现时间短的突发词可以发现,对于 root exudation 研究也在经历着一个不断深化、细致的挖掘过程,反映了该研究仍存在众多科学问题有待发现和阐明(表 7)。

表 6 不同时期高频和具有中心性的关键词信息

年份	关键词(频次/中心性)
2001—2009	root exudation (422/0.01); plant (239/0.01); soil (200/0.02); organic acid (146/0.09); accumulation (42/0.12); microorganism(31/0.04); maize (35/0.09);elevated CO ₂ (81/0.1); microbial community (49/0.03); <i>Arabidopsis thaliana</i> (23/0.03); leaf litter (10/0.01); climate change (43/0.05)
2010—2015	plant growth (36/0.05);vascular plant (6/0.01); microbial community structure (15/0.04); enzyme activity (22/0.02); growth promoting rhizobacteria (10/0.01); oxidative stress (9/0.08)
2016—2021	N availability (19/0.02);drought (17/0.02); induced systemic resistance (7/0.03); phenolic compound (6/0.01); chlorosis (3/0.01); organic acid anion (2/0.02)

表 7 突发性关键词信息

关键词	强度	起始年份	结束年份	时间段
<i>Zea mays</i> L.	9.05	2001	2006	
<i>Lolium perenne</i>	8.36	2001	2008	
proteoid root	6.29	2003	2007	
drought	6.15	2017	2021	
dynamics	5.55	2011	2014	
impact	5.37	2014	2016	
microbial community	5.01	2014	2021	
bacterial community	5.00	2019	2021	
cluster root	5.00	2002	2007	
pH	4.98	2004	2010	
citrate	4.81	2005	2009	
iron	4.72	2001	2010	

注: 表示关键词出现频次未有显著变化的年份; 表示关键词出现频次出现显著变化(突然增加)的年份。

3.2.2 关键词聚类分析 将 WOS 数据集进行关键词聚类分析(表 8),其中节点数 593,连线 1 183 条。 Q 值=0.721 2(Q 值值域为[0,1], $Q>0.3$ 则表示可视化结构显著),平均轮廓值 $S=0.855\ 6$ ($S>0.5$ 则表示聚类结果可信)。通过聚类大小及同质性强弱,能够回顾研究领域的基础内容,找到研究领域的高支撑方向;结合时间线可视化(time-line view)图谱(图 6)能够分析学科领域研究方向转移的时间演化路径,为进一步在高支撑方向内寻找更多的应用可能性提供帮助。聚类大小越大,表明聚类文献数量越多,侧面反映该方向已有研究支撑性高(表

8);节点面积越大,表明该关键词中心程度高(图 6)。综合分析表 8 和图 6 可知,聚类程度较大的分类为#0 根际沉积(rhizodeposition)、#1 碳(carbon)、#2 根系分泌物(root exudation)以及#3 抵抗力(resistance),这 3 类的共同特点围绕根际土壤碳、磷等理化性质^[45-46]与分泌物氨基酸、有机酸^[47-48]等的作用与关系展开研究,时间尺度上关注度持续较长,属于 root exudation 与土壤的研究和应用。其中 0#聚类 rhizodepositio 除了 2001 年,在 2005 年和 2006 年都有较高的研究支撑性,表明未来仍具有稳定的研究前景。第二部分是#4 落叶(defoliation)、

表 8 关键词聚类信息

聚类名称	大小 (节点数)	同质性	突现词(对数似然比, <i>P</i> 值)
#0 rhizodeposition	65	0.873	rhizodeposition (50.08,0.000 1); soil organic matter (27.6,0.000 1); roots (22.71,0.000 1); priming effect (19.42,0.0001); carbon turnover (14.02,0.001); root respiration(14.02,0.001)
#1 carbon	56	0.764	carbon(15.07,0.001); amino acids (14.54,0.001); plfa (12.91,0.001); intraspecific variation (9.44,0.005); kin recognition (9.44,0.005); soil feedback (9.44,0.005)
#2 root exudation	55	0.848	root exudation(40.61,0.000 1); rhizosphere(37.09,0.000 1); phosphorus(35.69,0.000 1); citrate (27.52,0.0001); cluster roots (26.73,0.000 1); carboxylates (24.52,0.000 1)
#3 resistance	51	0.742	resistance(15.99,0.000 1); tolerance (13.54,0.001); Zn efficiency (10.66,0.005); hydroponics (10.66,0.005); citric acid (9.72,0.005); organic acid exudation(9.69,0.005)
#4 defoliation	39	0.871	defoliation(15.53,0.000 1); kinetics (14.93,0.001); carbon dioxide (14.83,0.001); respiration(13.15,0.001); drought(11.22,0.001); organic acids(10.97,0.001)
#5 arbuscular mycorrhiza	34	0.900	arbuscular mycorrhiza (24.13,0.000 1); root exudates (12.31,0.001); exudates (10.85,0.001); dichantium aristatum (9.66,0.005); reactive oxygen species (9.66,0.005); acacia(9.66,0.005)
#6 decomposition	32	0.887	decomposition(12.03,0.001); subtropical forest (11.92,0.001); microbial biomass (9,0.005); polycyclic aromatic hydrocarbon (8.2,0.005); soil respiration (7.6,0.01); organic acids(7.52,0.01)
#7 allelopathy	29	0.887	allelopathy(26,0.000 1); allelochemicals (22.59,0.000 1); weed management (16.7,0.000 1); weed suppression (16.7,0.000 1); heavy metals (16.01,0.000 1); phytoremediation(15.55,0.000 1)
#8 soil solution	29	0.857	soil solution(14.2,0.001); pH (13.02,0.001); adsorption (12.14,0.001); root growth(10.64,0.005); dissolved organic carbon(9.7,0.005); P deficiency(9.49,0.005)
#9 dgge	28	0.902	dgge(22.95,0.000 1); microbiome(14.94,0.001); basta(13.99,0.001); soil type (13.99,0.001); butisan s(13.99,0.001); pat gene(13.99,0.001)
#10 organic matter decomposition	24	0.879	organic matter decomposition (17.04,0.000 1); flux (14.31,0.001); elevated atmospheric co2 (12.15,0.001); wetlands (10.55,0.005); extracellular enzyme (8.88,0.005); carbon allocation (8.49,0.005)

#5 丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza)、#6 分解作用(decomposition),这三类聚类程度中等,均有很重要的核心关键词,包括二氧化碳(carbon dioxide)、呼吸作用(respiration)、根系分泌物(root exudation)、有机酸(organic acids)、土壤呼吸(soil respiration),表明它们在土壤生态学中也有研究的意义^[49]。其中#5 丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza)起步相对其他聚类较晚,研究热度从2006年持续至2019年,之后研究较少,有一部分原因可能是研究周期长。然后是#7 化感作用(allelopathy)、#8 土壤溶液(soil solution)、#9 凝胶电泳(dgge)、#10 有机质分解(organic matter decomposition),这些聚类的特点是研究细化且深入,是交叉学科难点,技术前沿应用

广泛的领域,#7 allelopathy 连续多年有持续关注度^[50-51],至今也是 root exudation 相关研究的热点方向。随着研究进程的不断发 展,很有可能成为未来十分有前景的研究方向。

3.3 文献共被引聚类分析

被引频次决定着文献的影响力大小,是反映作者科研水平和学术影响力的直接体现。文献半衰期别称文献半生期,指某学科(专业)现时尚在利用的全部文献中较新的一半是在多长一段时间内发表的,能够评价文献的老化速度,文献的半衰期越长,则代表文献越有价值^[52]。由图7、表9可知,关键节点的文献多出自以下3个方向:根系分泌物对土壤碳氮的影响;根际的作用或影响;根系分泌物

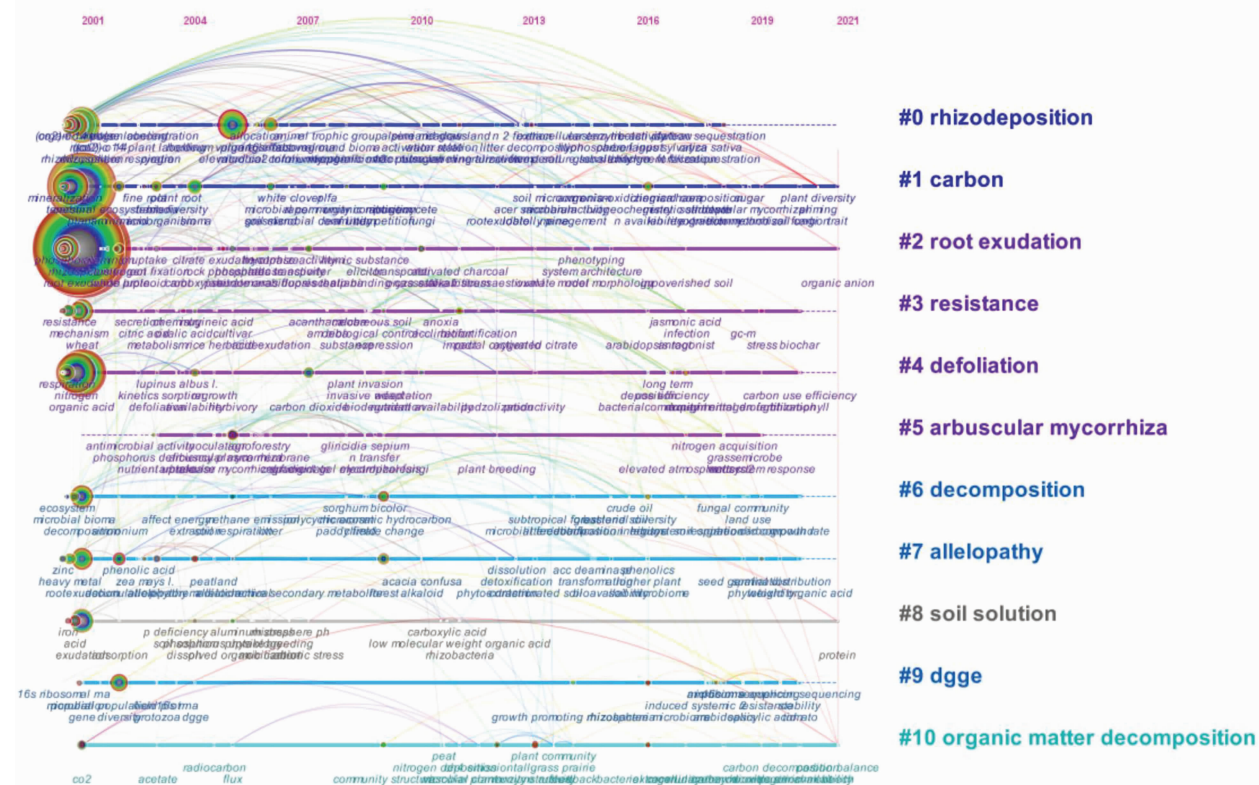


图6 关键词聚类时间线



图7 根分泌物研究文献共被引聚类知识图谱

表 9 共被引聚类关键节点文献

发表年份	题目	第一作者	期刊名	被引频次	半衰期 (年)
2011	Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO ₂ fumigation	Phillips R P	EcolLett	40	2.5
2015	Rhizosphere processes are quantitatively important components of terrestrial carbon and nutrient cycles	Finzi A C	Global Change Biology	28	2.5
2015	Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates	Keiluweit M	Nature Climate Change	26	3.5
2013	Stoichiometry constrains microbial response to root exudation – insights from a model and a field experiment in a temperate forest	Drake J E	Biogeosciences	26	2.5
2014	Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming	Cheng W X	New Phytologist	26	2.5
2018	Sampling root exudates – mission impossible?	Oburger E	Rhizosphere – Neth	24	1.5
2013	Rhizosphere priming: a nutrient perspective	Dijkstra F A	Front Microbiol	24	2.5
2019	Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli	Canarini A	Front Plant Sci	23	0.5
2004	Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition	Jones D L	New Phytologist	22	2.5
2014	Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization	Zhu B	Soil Biol Biochem	18	3.5

与微生物的相互关系。其中被引频次最高的国外作者 Phillips 等于 2011 年发表题为“Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO₂”的文章^[53], 该研究对 420 个完整火炬松 (*Pinus taeda* L.) 根系分泌物进行原位测量, 说明渗出液刺激了微生物活性, 加速土壤有机质 (SOM) 的周转, 发现在低肥力土壤中, 森林对 CO₂ 升高的持续生长响应是通过根源 C 输入促进的微生物活性和 N 循环的增强来维持的。这些变化可能会阻止森林生态系统中土壤碳的积累。位列第二的美国波士顿大学生物系的 Finzi 等使用一个受化学计量限制的微生物分解模型, 表明根际效应可以由相对适度的根源 C 通量引起, 分别约占总初级生产和净初级生产的 4%、6%, 且根际过程在生态系统尺度上是广泛的、定量的、重要的 SOM 分解和养分释放驱动因素, 对全球碳储量和植被对气候的反馈具有潜在影响^[54]。位列第三的 Keiluweit 等发现一种常见的根系分泌物——草酸, 通过释放与矿物质保护性关联的有机化合物, 促进碳损失, 通过加强微生物对以前矿物保护化合物的接触, 这种间接机制可以加速碳损失^[55]。被引频次第四的 Drake 等认为, 根系分泌物被认为增加了微生物及其合成的外酶的活性, 导致根际土壤中碳矿化和养分循环的速度加快^[56]。微生物生物量和胞

外酶的氮含量可能会对微生物有效利用根系分泌物的能力产生化学计量上的限制, 特别是如果分泌物富含 C 但是低 N, 他们结合微生物活动的理论模型和一个分泌试验来测试假设土壤微生物利用根分泌物的能力受到额外的生物量和胞外酶合成 N 的可用性。表明分泌物化学计量学是根际土壤微生物活性的重要驱动因素。被引频次第五的来自中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室的 Cheng 等, 他们发现根际启动效应 (RPE) 是植物与土壤功能相互作用的机制^[57], 并通过基于微生物生理学的模型模拟, 证明微生物对植物不同基质输入的代谢反应的变化是导致正或负 RPEs 的可能机制。整体来看, 10 篇高被引的文献半衰期都不高, 在 0.5 ~ 3.5 年, 文献老化速度较快, 也表明根系分泌物的高被引文献在发表近 3 年具有较高的活力。

4 结论

根系分泌物研究领域总发文量及引用次数均呈逐年递增趋势, 国内外根系分泌物研究都经历了前期的探索和发展、中期的沉淀以及后期快速增长。中外研究侧重点不同, 基于关键词共现聚类分析, 发现当前国内研究热点集中在农业科学方面, 如农业种植模式、不同作物研究、微生物等; 国外研

究热点在根系分泌物与土壤碳氮的关系、根际沉积作用、根系分泌物与微生物相互作用以及模型的运用。中外学者在根系分泌物应用研究方面侧重点不同,各有所长,国内应用方向分支少,主要以农业生产作物种植为主;国外以土壤生态配合模型模拟应用到揭示森林等生态问题机制机理当中。根系分泌物国内未来研究和应用的重点可能在于根系分泌物-土壤-根际微生物对农业的支撑,为我国推动农业可持续发展提供思路。国外未来研究和应用的重点可能在于根际-根系分泌物-环境的反应机制及其作用。相关的生物化学、分子生物学、分析化学等交叉学科在未来将会展现其不同优势,以不同途径推动根系分泌物领域研究的进步。

参考文献:

- [1] Sokolova T A. Low - molecular - weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: a review [J]. *Eurasian Soil Science*, 2020, 53(5): 580 - 594.
- [2] Zhao M L, Zhao J, Yuan J, et al. Root exudates drive soil - microbe - nutrient feedbacks in response to plant growth [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(2): 613 - 628.
- [3] 朱丽霞, 章家恩, 刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 102 - 105.
- [4] 张治宏, 杨诗卡, 韩超, 等. 环境胁迫对水生植物根系分泌小分子量有机酸(LMWOAs)的影响特征[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(2): 462 - 471.
- [5] Iannucci A, Canfora L, Nigro F, et al. Relationships between root morphology, root exudate compounds and rhizosphere microbial community in durum wheat [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 158: 103781.
- [6] Uselman S M, Qualls R G, Thomas R B. A test of a potential short cut in the nitrogen cycle: the role of exudation of symbiotically fixed nitrogen from the roots of a N - fixing tree and the effects of increased atmospheric CO₂ and temperature [J]. *Plant and Soil*, 1999, 210(1): 21 - 32.
- [7] Wang W H, Lu C. Visualization analysis of big data research based on Citespace [J]. *Soft Computing*, 2020, 24(11): 8173 - 8186.
- [8] 李琳璐. 国内外大学生学习性投入研究综述——基于 CiteSpace 的文献计量可视化分析[J]. *中国人民大学教育*, 2021(2): 136 - 159.
- [9] Chen C M. Visualizing and exploring scientific literature with CiteSpace [P]. *Human Information Interaction & Retrieval*, 2018.
- [10] 谈桂露, 杨建昌. 根系化学信号与稻米品质的关系[J]. *中国农学报*, 2009, 25(24): 171 - 178.
- [11] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3496 - 3504.
- [12] Oburger E, Jones D L. Sampling root exudates - mission impossible? [J]. *Rhizosphere*, 2018, 6: 116 - 133.
- [13] 王亚君, 王腾琦, 侯志洁, 等. 根系分泌物对紫云英油菜间作的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1783 - 1790.
- [14] 贺永华, 沈东升, 朱荫澍. 根系分泌物及其根际效应[J]. *科技通报*, 2006, 22(6): 761 - 766.
- [15] 杨瑞吉. 油菜根系分泌物对不同作物幼苗生长的化感效应[J]. *生态环境*, 2006, 15(5): 1062 - 1066.
- [16] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 等. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展[J]. *生态环境*, 2006, 15(1): 184 - 189.
- [17] 陈利, 肖靖秀, 郑毅. 间作玉米大豆根系分泌物中有机酸的变化特征[J]. *西南林业大学学报*, 2016, 36(5): 78 - 83.
- [18] 曲晓华, 赵晓燕, 马杰, 等. 大豆根系分泌物中特定物质对土壤微生物活性的影响[J]. *福建农业学报*, 2015, 30(3): 298 - 302.
- [19] 杨利宁, 敖特根·白银, 李秋凤, 等. 苜蓿根系分泌物对土壤中难溶性磷的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(8): 1216 - 1221.
- [20] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 等. 小麦 || 蚕豆间作对根系分泌糖和氨基酸的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1825 - 1830.
- [21] 高雪峰, 贾渊. 荒漠草原植物根分泌物中有机酸组分分析及其生态效应研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 1927 - 1934.
- [22] 袁仁文, 刘琳, 张蕊, 等. 植物根际分泌物与土壤微生物互动关系的机制研究进展[J]. *中国农学报*, 2020, 36(2): 26 - 35.
- [23] 齐永志, 孙雅如, 王冰, 等. 草莓根系分泌物和腐解物化感作用研究进展[J]. *园艺学报*, 2021, 48(4): 778 - 790.
- [24] 周宝利, 陈志霞, 杜亮, 等. 不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3964 - 3972.
- [25] 刘京伟, 李香真, 姚敏杰. 植物根际微生物群落构建的研究进展[J]. *微生物学报*, 2021, 61(2): 231 - 248.
- [26] 高雪峰, 韩国栋. 短花针茅根系分泌物对荒漠草原土壤细菌群落及土壤养分的影响[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(6): 76 - 84.
- [27] 薛蓉蓉, 罗智捷, 黄宇晴, 等. 十字花科植物与食用菌共培养通过根系分泌物促进菌丝生长[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2019, 48(2): 231 - 237.
- [28] 蔡银美, 赵庆霞, 张成富. 低磷下植物根系分泌物对土壤磷转化的影响研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(2): 79 - 86.
- [29] 孙晨瑜, 曾燕红, 马俊卿, 等. 丛枝菌根真菌对黄花蒿生长和根系分泌物化学组成的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(9): 1831 - 1837.
- [30] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 等. 施氮和干湿灌溉对水稻抽穗期根系分泌有机酸的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(4): 516 - 525.
- [31] 赵宽, 周葆华, 马万征, 等. 不同环境胁迫对根系分泌有机酸的影响研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 235 - 240.
- [32] 禹珂, 王孝林, 张学斌, 等. 植物根系与益生菌相互作用的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(11): 2275 - 2287.
- [33] Sun L J, Ataka M, Han M G, et al. Root exudation as a major competitive fine - root functional trait of 18 coexisting species in a subtropical forest [J]. *New Phytologist*, 2021, 229(1): 259 - 271.

- [34] Maurer D, Kiese R, Kreuzwieser J, et al. Processes that determine the interplay of root exudation, methane emission and yield in rice agriculture[J]. *Plant Biology*, 2018, 20(6): 951 – 955.
- [35] Preece C, Peñuelas J. A return to the wild: root exudates and food security[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(1): 14 – 21.
- [36] Walker T S, Bais H P, Grotewold E, et al. Root exudation and rhizosphere biology[J]. *Plant Physiology*, 2003, 132(1): 44 – 51.
- [37] Aulakh M S, Wassmann R, Bueno C, et al. Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. *Plant Biology*, 2001, 3(2): 139 – 148.
- [38] Phillips R P, Erlitz Y, Bier R, et al. New approach for capturing soluble root exudates in forest soils[J]. *Functional Ecology*, 2008, 22(6): 990 – 999.
- [39] Phillips D A, Fox T C, King M D, et al. Microbial products trigger amino acid exudation from plant roots[J]. *Plant Physiology*, 2004, 136(1): 2887 – 2894.
- [40] Kaštovská E, Edwards K, Pícek T, et al. A larger investment into exudation by competitive versus conservative plants is connected to more coupled plant – microbe N cycling[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 122(1): 47 – 59.
- [41] Kaiser C, Kilburn M R, Clode P L, et al. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation[J]. *New Phytologist*, 2015, 205(4): 1537 – 1551.
- [42] Sun L J, Ataka M, Kominami Y, et al. A constant microbial C/N ratio mediates the microbial nitrogen mineralization induced by root exudation among four co – existing canopy species [J]. *Rhizosphere*, 2021, 17: 100317.
- [43] Williams A, de Vries F T. Plant root exudation under drought: implications for ecosystem functioning[J]. *The New Phytologist*, 2020, 225(5): 1899 – 1905.
- [44] Rolfe S A, Griffiths J, Ton J. Crying out for help with root exudates: adaptive mechanisms by which stressed plants assemble health – promoting soil microbiomes[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2019, 49: 73 – 82.
- [45] Dijkstra F A, Carrillo Y, Pendall E, et al. Rhizosphere priming: a nutrient perspective[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 216.
- [46] Aoki M, Fujii K, Kitayama K. Environmental control of root exudation of low – molecular weight organic acids in tropical rainforests[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(7): 1194 – 1203.
- [47] Gaume A, Mächler F, de León C, et al. Low – P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation[J]. *Plant and Soil*, 2004, 228: 253 – 264.
- [48] Canarini A, Kaiser C, Merchant A, et al. Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 157.
- [49] Vives – Peris V, de Ollas C, Gómez – Cadenas A, et al. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond[J]. *Plant Cell Reports*, 2020, 39(1): 3 – 17.
- [50] Oliveros – Bastidas A D J, Macías F A, Carrera F C, et al. Exudados de la raíz y su relevancia actual en las interacciones alelopáticas root exudates and their relevance to the allelopathic interactions [J]. *Química Nova*, 2009, 32(1): 198 – 213.
- [51] Scavo A, Abbate C, Mauromicale G. Plant allelochemicals: agronomic, nutritional and ecological relevance in the soil system [J]. *Plant and Soil*, 2019, 442(1/2): 23 – 48.
- [52] Száva – Kovács E. Unfounded attribution of the “half – life” index – number of literature obsolescence to Burton and Kebler: a literature science study[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2002, 53(13): 1098 – 1105.
- [53] Phillips R P, Finzi A C, Bernhardt E S. Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long – term CO₂ fumigation[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 187 – 194.
- [54] Finzi A C, Abramoff R Z, Spiller K S, et al. Rhizosphere processes are quantitatively important components of terrestrial carbon and nutrient cycles[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 2082 – 2094.
- [55] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 588 – 595.
- [56] Drake J E, Darby B A, Giasson M A, et al. Stoichiometry constrains microbial response to root exudation – insights from a model and a field experiment in a temperate forest[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2): 821 – 838.
- [57] Cheng W X, Parton W J, Gonzalez – Meler M A, et al. Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming[J]. *New Phytologist*, 2014, 201(1): 31 – 44.