

基于文献计量的腐植酸农业应用研究态势分析^①

徐灵颖¹, 白胜军¹, 郭景丽², 刘锐杰², 岳艳军², 赵旭^{1*}

(1 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南新乡 453731)

摘要: 为客观剖析全球腐植酸农业应用的研究现状, 精准总结现阶段研究的重点与薄弱环节, 为该领域的科研工作者与决策者提供参考依据。本研究利用 Web of Science(WOS)数据库中近 30 年腐植酸农业应用领域的相关文献, 从发文量、国家或地区、作者、学科、发文机构、文献共被引以及关键词等多个维度开展文献计量分析。结果表明: 腐植酸农业应用研究起步较早, 且研究热度始终保持高位。中国在论文发表量方面位列全球之首, 但在科研影响力方面仍有较大提升空间。当前, 研究热点主要聚焦腐植酸环境地球化学行为、腐植酸在土壤修复中的应用、腐植酸分类与性质表征, 以及腐植酸在农作物生产中的应用等领域。腐植酸农业应用研究正从单纯的腐植酸性质评价, 稳步向应用效果的环境经济效益综合评价方向不断完善。未来, 优化腐植酸人工合成制备工艺将成为腐植酸农业应用研究的重要方向与目标。通过该方向的深入研究, 有望推动腐植酸在农业领域的高效、精准应用, 为农业可持续发展提供坚实的技术支撑。

关键词: 腐植酸; 农业应用; 文献计量; 研究热点; 知识图谱

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A

Analysis of Research Trends of Humic Acid in Agricultural Applications Based on Bibliometrics

XU Lingying¹, BAI Shengjun¹, GUO Jingli², LIU Ruijie², YUE Yanjun², ZHAO Xu^{1*}

(1 Changshu National Agro-ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 Henan Xinlianxin Chemical Industry Group Co., Ltd., Xinjiang, Henan 453731, China)

Abstract: The aim of this study is to objectively assess the research field of humic acid applications in global agriculture. By precisely summarizing the focal points and inadequacies of current research, it endeavors to offer references for researchers and decision-makers. The relevant literatures from the Web of Science (WOS) regarding humic acid in agricultural applications over the past 30 years were employed, through bibliometric methods, systematic quantitative and qualitative analyses are conducted from multiple aspects, including publication volume, countries/regions, authors, disciplines, publishing institutions, co-cited literature, and keyword analysis. The results indicate that the research on humic acid in agricultural applications initiated relatively early and has sustained a high level of research enthusiasm. Although China ranks first globally in the number of published papers, there remains substantial space for enhancing its scientific research influence. Presently, research hotspots are concentrated on the environmental geochemical behavior of humic acid, its application in soil remediation, the classification and property characterization of humic acid, as well as its application in crop cultivation. Overall, the research on humic acid agricultural applications is gradually evolving from merely evaluating humic acid properties to comprehensively assessing the environmental and economic benefits of its application effects. Looking forward, optimizing the artificial synthesis and preparation process of humic acids will be the crucial research directions and objectives. In-depth exploration in this area is anticipated to boost the efficient and accurate application of humic acid in agriculture, thereby providing a solid technical underpinning for the sustainable development of the agricultural sector.

Key words: Humic acid; Agricultural applications; Bibliometrics; Research hotspots; Knowledge mapping

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (32202608)和河南心连心公司技术开发项目 (2020320104000637)资助。

* 通信作者(zhaoxu@issas.ac.cn)

作者简介: 徐灵颖(1993—), 女, 浙江台州人, 博士, 主要研究方向为农田障碍土壤扩容增效提质。E-mail: xulingying@issas.ac.cn

腐植酸(Humic acid, HA)作为一种广泛存在于自然界的重要物质,储量极为可观,在江河湖海、土壤、泥炭及低品位煤炭中均有分布^[1-2]。腐植酸的形成过程漫长而复杂,是动植物残体经地球物理、化学一系列相互作用以及微生物的分解转化形成的一类芳香族无定形高分子化合物,富含羧基、酚羟基、甲氧基等含氧官能团^[3]。腐植酸复杂的结构使得其在农业生产中具有刺激作物生长、改良土壤、增加养分利用、增强作物抗逆性和改善农产品品质等多重功效^[4-5]。

经过长期不懈的研究与实践,腐植酸在农业领域的应用研究已经取得了显著的进展。前期学者借助元素分析、光谱分析、核磁分析、电镜能谱等技术手段,对腐植酸的化学结构与物理化学性质进行了细致入微的剖析^[6-7]。在此基础上,围绕土壤改良、养分增效等实际应用方向开展了大量的腐植酸应用研究相关工作。在土壤改良方面,腐植酸的溶解性使得腐植酸肥料的羧基和酚羟基基团能同时释放出氢氧基,不仅可以起到缓冲土壤 pH 的作用,还能显著增强土壤团聚体的稳定性,提升土壤的通气性^[8]。在养分增效方面,腐植酸的芳香碳和脂肪族结构特性发挥着关键作用,不仅能够刺激作物根系的生长发育,使根系更加发达,还能显著促进作物光合作用产物的积累,增加可溶性糖含量,为作物的高产优质奠定坚实基础^[9-11]。然而,不可忽视的是,腐植酸本身具有高度的异质性,其结构组成会因来源不同、形成环境差异而表现出极大的复杂性^[12]。这就导致在不同的研究条件与应用场景下,腐植酸所展现出的作用与功能结果存在显著差异^[4-13]。研究认为,腐植酸的羟基基团和羧基基团与土壤中的金属离子形成配位键,虽然会增加土壤中的微量营养元素含量,但在特定的土壤质地、酸碱度以及作物品种等条件下,却可能干扰作物对大量元素养分的正常吸收与转运,降低作物对养分的实际利用率^[9]。除了自身特性导致的效果差异,在腐植酸的实际田间应用过程中,外部环境因素如气候条件、土壤性质等也会对其效果产生显著影响。以土壤性质为例,土壤质地^[14]、酸碱度^[15]、阳离子交换量等因素,均会影响腐植酸与土壤颗粒、微生物以及农作物根系之间的相互作用。尽管腐植酸农业应用研究已取得诸多成果,但面对海量的国际学术文献,目前仍缺乏系统、全面的文献计量学研究。文献计量学以公开发表文献中发文量、作者、机构、被引文献、关键词时序演变及突现特征等作为分析对象,运用数理统计方法,分析某一领域的研究成果、研究现状、研究热点,并通过可视化的方式直观呈现该领域的研究脉络与

发展趋势,进而推断未来的研究方向^[16],对全面、深入地洞察腐植酸农业应用研究领域的发展态势具有重要意义。

综上,本研究利用文献计量方法与可视化软件 CiteSpace 6.3.R3 和 VOSviewer,对 1994—2024 年全球腐植酸农业应用研究成果做系统梳理和总结,旨在客观、准确地揭示腐植酸农业应用研究的发展历程及演变趋势,深度挖掘腐植酸农业应用理论与实践研究的前沿热点问题,为后续相关研究提供具有前瞻性、指导性的借鉴与启示。

1 数据来源与统计方法

1.1 数据来源与筛选

本文关于“腐植酸”(或“腐殖酸”)主题学术期刊论文的数据样本来源于 Web of Science 数据库核心集,通过主题检索方式获取:主题=(“humic acid” & (“agriculture” OR “agricultural”)),数据采集时间截止至 2024 年 8 月 24 日,时间跨度为 1980—2024 年。结合人工筛选并排除会议记录、新闻、数据论文等类型文献,检索得到 13 217 篇有效文献。用兼容 CiteSpace 数据处理格式的纯文本形式(reference)导出入选的文献记录,所包含的信息涵盖了作者、标题、出版源和摘要等共 11 类数据。

1.2 统计方法

使用可视化分析软件 CiteSpace 6.3.R3 和 VOSviewer 对文件进行数据挖掘。首先绘制国家/地区、研究机构合作网络及学科共现特征图谱,接着开展作者及其合作网络分析,随后对关键词进行共现分析,再将聚类词进行时间轴(Timeline)分析,最终获得相关图谱。论文数据集确定时间划分(Timing slicing),涵盖了所有的论文数据,时间节点切片(Years PerSlice)设定为 1 年,术语的来源(Term Source)勾选为标题(Title)、关键词(Keyword)、摘要(Abstract)等,通过不同的功能选择,分析相关领域研究文献变化趋势、国家/地区/研究机构合作网络、研究热点和主题演化趋势等,并形成可视化知识图谱^[17]。

2 结果与分析

2.1 腐植酸农业应用文献特征

2.1.1 年文献分布特征 如图 1 所示,腐植酸农业应用领域的文献发表数量呈现出极为显著的增长趋势。在所有相关文献中,90% 是在近 30 年内发表的,其中近 20 年发表的论文数量多达 9 861 篇,占比达 71%。从总体发文量的变化趋势审视,该领域的

发展历程可划分为 3 个阶段：①初步探索阶段：1980 年以前属于零散研究期。②快速发展阶段：主要集中在 1980—1993 年期间。这一时期，该领域的年均发文量约为 70 篇，呈现出稳步攀升的良好态势。在此期间，各国科学家积极加强交流与合作，开展了大量的田间试验和示范推广项目，不仅有力地验证了腐植酸肥料的显著肥效和环保特性，更为其在全球范围内的广泛应用奠定了坚实的实践基础^[18-19]。③井喷式研究发展阶段：从 1994 年持续至今。在这一时期，论文发表量呈现出爆发式增长，年均高达 394 篇，约

为上一时期的 5 倍之多，这充分表明该领域的研究在国际上获得了前所未有的关注。在这一阶段，腐植酸农业应用研究主要聚焦于增产增效和生态环境保护两大核心目标^[19]。其中，腐植酸肥料如何转型升级为“绿色肥料”成为研究的热点。同时，腐植酸产业也逐步迈向标准化发展道路。以我国为例，《褐炭和褐煤腐植酸的测定》^[20]、《腐植酸原料及肥料术语》^[21]等国家标准以及《含腐植酸水溶肥料》^[22]、《煤系腐植酸复混肥料技术条件》^[23]等行业标准相继正式实施，有力推动了腐植酸农业应用行业的蓬勃发展。

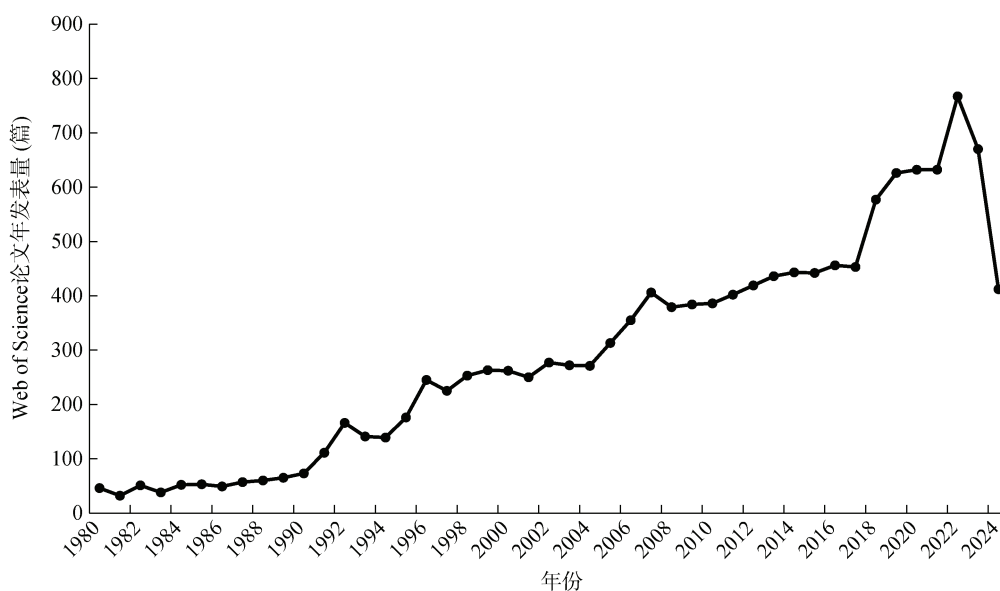


图 1 1980—2024 年腐植酸农业应用国际研究文献时间分布

Fig. 1 Temporal distribution of international research literatures on humic acid in agricultural applications from 1980 to 2024

2.1.2 国家/地区、研究机构合作网络 表 1 呈现了近 30 年腐植酸农业应用研究相关论文主要产出国家，可见，中国以 3 442 篇的论文总量独占鳌头。此外，在论文产出数量排名前 10 位的机构中(表 2)，来自中国的机构有 3 所，这充分表明该领域研究中国在研究机构的数量和排名上均占据着显著优势。结合图 2 与表 1 的数据可以看出，法国、波兰、西班牙的中介中心性数值较高，分别达到 0.19、0.12、0.13，表明在腐植酸农业应用的合作研究中，上述国家与其他国家的合作频次较多，且所发表论文的影响力也较为强劲。中国科学院(0.22)、罗蒙诺索夫莫斯科国立大学(0.21)、西班牙国际研究委员会(0.16)、中国环境科学研究院(0.16)等机构展现出较高的中介中心性，表明这些机构与其他众多机构之间合作频繁且紧密。突现值结果显示，中国、意大利、美国位列全球前 3 位，分别为 174.36、42.05、29.23，表明我国在腐植酸农业应用研究领域的成果增长速度最为迅

猛，论文质量与国际影响力正稳步提升，在国际舞台上的地位愈发重要。

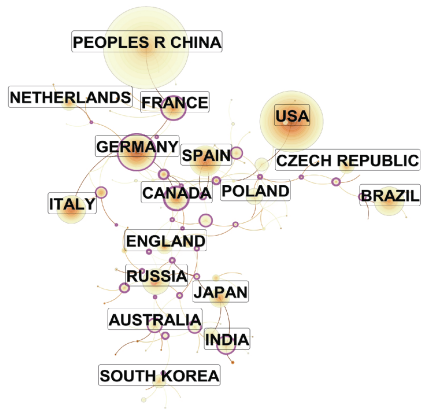
表 1 腐植酸农业应用研究发文量前 10 位的国家
Table 1 Countries with top 10 in paper publications of humic acid in agricultural applications

序号	国家	发文量 (篇)	中介中心性	突现值
1	中华人民共和国 (PEOPLES R CHINA)	3 442	0.11	174.36
2	美国(USA)	1 600	0.01	29.23
3	巴西(BRAZIL)	591	0.06	
4	德国(GERMANY)	583	0.05	15.73
5	西班牙(SPAIN)	549	0.13	4.90
6	意大利(ITALY)	536	0.01	42.05
7	俄罗斯(RUSSIA)	464	0.09	
8	法国(FRANCE)	405	0.19	8.20
9	日本(JAPAN)	348	0.03	9.87
10	波兰(POLAND)	312	0.12	

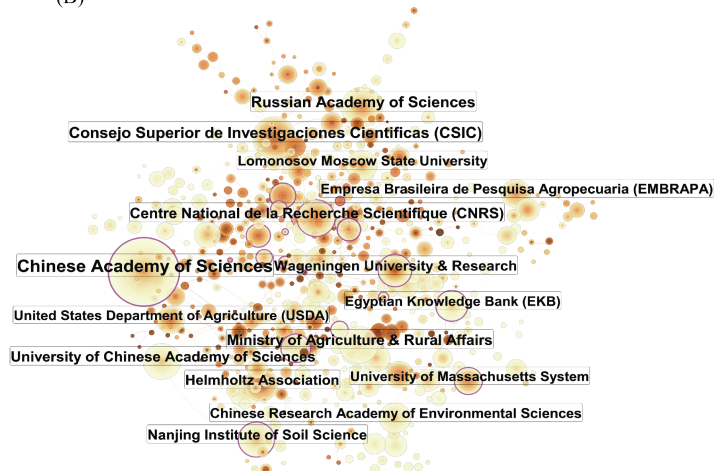
表 2 腐植酸农业应用研究发文量排名前 10 位的机构
Table 2 Top 10 institutions in paper publications of humic acid in agricultural applications

序号	机构	所属国家	发文量(篇)	中介中心性	突现值
1	中国科学院(Chinese Academy of Sciences)	中国	469	0.22	3.26
2	俄罗斯科学院(Russian Academy of Sciences)	俄罗斯	283	0.14	
3	西班牙国际研究委员会(Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, CSIC)	西班牙	265	0.16	29.01
4	国家科学研究中心(Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS)	法国	233	0.14	4.93
5	中国环境科学研究院(Chinese Research Academy of Environmental Sciences)	中国	180	0.16	7.38
6	巴西农业研究院(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, EMBRAPA)	巴西	161	0.06	10.02
7	埃及知识库(Egyptian Knowledge Bank, EKB)	埃及	161	0.04	4.69
8	罗蒙诺索夫莫斯科国立大学(Lomonosov Moscow State University)	俄罗斯	157	0.21	
9	瓦赫宁根大学研究中心(Wageningen University & Research)	荷兰	150	0.12	
10	中国农业大学(China Agricultural University)	中国	149	0.02	13.25

(A)



(B)



(图中圆圈表示中介中心性, 圆圈内颜色越深, 代表该节点的中介中心性越大, 合作网络形成的贡献越突出^[24])

图 2 腐植酸农业应用研究国家/地区(A)和机构(B)合作网络

Fig. 2 Networks of national(A) and institutional (B) collaborations in research on humic acid in agricultural applications

2.1.3 学科共现特征图谱 学科共现分析可构建学科间的关联网, 揭示交叉学科间的内在联系。在众多学科中, 腐植酸农业应用研究在环境科学、土壤学、植物科学、分析化学、水资源、农学以及化学等学科的表现尤为突出(图 3、表 3), 它们与其他学科交叉范围极为广泛。该领域研究虽然在土壤学、植物学、分析化学以及物理化学学科的交叉频次较多, 但它们的中介中心性并不高。这表明在当前腐植酸农业应用研究中, 这些学科在很大程度上仍局限于在自身学科范畴内开展研究, 彼此间尚未充分挖掘出跨学科研究的潜力。腐植酸农业应用研究在土壤学、植物科学、分析化学以及物理化学学科均呈现出较高的突现值, 说明腐植酸性质表征及其在土壤环境中的作用

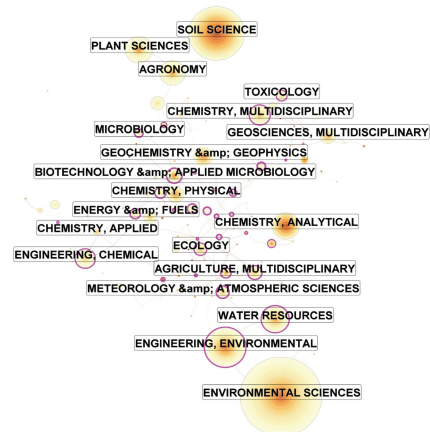


图 3 腐植酸农业应用研究学科共现特征图谱

Fig. 3 Network of discipline co-occurrence of research subjects on humic acid in agricultural applications

表 3 排名前 10 位的腐植酸农业应用研究学科
Table 3 Top 10 research disciplines of research subjects on humic acid in agricultural applications

序号	学科类别	首发年份	频次	中介中心性	突现值
1	环境科学(ENVIRONMENTAL SCIENCES)	1994	5 286	0.09	
2	土壤学(SOIL SCIENCE)	1994	2 586		12.68
3	工程, 环境(ENGINEERING, ENVIRONMENTAL)	1994	1 568	0.12	
4	植物科学(PLANT SCIENCES)	1994	864		29.08
5	分析化学(CHEMISTRY, ANALYTICAL)	1994	860		61.11
6	水资源(WATER RESOURCES)	1994	805	0.15	
7	农学(AGRONOMY)	1994	777	0.06	16.06
8	地球化学与地球物理学(GEOCHEMISTRY & GEOPHYSICS)	1994	540		10.20
9	化学, 交叉学科(CHEMISTRY, MULTIDISCIPLINARY)	1994	527	0.12	9.56
10	物理, 化学(CHEMISTRY, PHYSICAL)	1994	474		12.09

机制和对作物生长的影响等方面, 已经成为当前研究人员高度关注的热点领域。随着研究的不断深入, 这些热点领域有望取得更多突破性的成果, 为腐植酸农业应用的进一步发展提供坚实的理论基础和技术支持。

2.1.4 作者及其合作网络 作者合作研究网络图谱(图 4)显示, 共有 1 171 个节点, 1 092 条连线, 说明大量学者在该研究领域开展工作, 但尚未形成紧密且高效的合作网络。表 4 展示了近 30 年前 10 位开展腐植农业应用研究的活跃作者, 其中, 来自美国马萨诸塞大学的 Xing B(邢宝山)表现极为突出, 其在中介中心性和突现值这两项指标上均位居榜首, 分别达到 0.04 和 26.23。腐植酸农业应用研究领域作者形成了以 Xing B、Piccolo Alessandro、Senesi Nicola、Zhou D(周东美)、Weng L(翁丽萍)为代表的研究团队。被引作者信息可以识别某研究领域的高影响力作者。表 4 数据显示, Schnitzer M 和 Stevenson F J 的突现值在众多作者中名列前茅, 分

别高达 139.68 和 49.49。早在 1979 年, Schnitzer M 就在其著作《Soil Organic Matter》中, 深入探讨了以富里酸、胡敏酸(腐殖酸)和胡敏素为典型代表的土壤有机质组分, 并运用光谱学技术对其特征展开了系统研究^[25]。这一著作为后续研究奠定了坚实的理论基础, 其影响力贯穿了腐植酸农业应用研究的发展历程。此外, Schnitzer M 还创新性地通过将核磁、光谱等新技术联用, 对腐植酸的化学组成、结构特征以及官能团等化学特性进行了深入剖析, 明确了腐植酸在提高土壤肥力、促进植物生长等方面的重要作用^[26-29]。Stevenson F J 团队致力于研究人工腐植酸合成^[30]及腐植酸在土壤肥力^[31]和环境修复方面^[31-33]的应用, 其团队发表的文献至今仍是腐植酸在土壤修复和肥料增效领域的经典之作, 为该领域的研究提供了重要的理论支撑与实践指导。总体而言, 在腐植酸农业应用研究领域, 我国学者在高影响力研究成果方面的产出相对较少, 未来需要加强国际合作与交流, 提高在该领域的学术影响力。

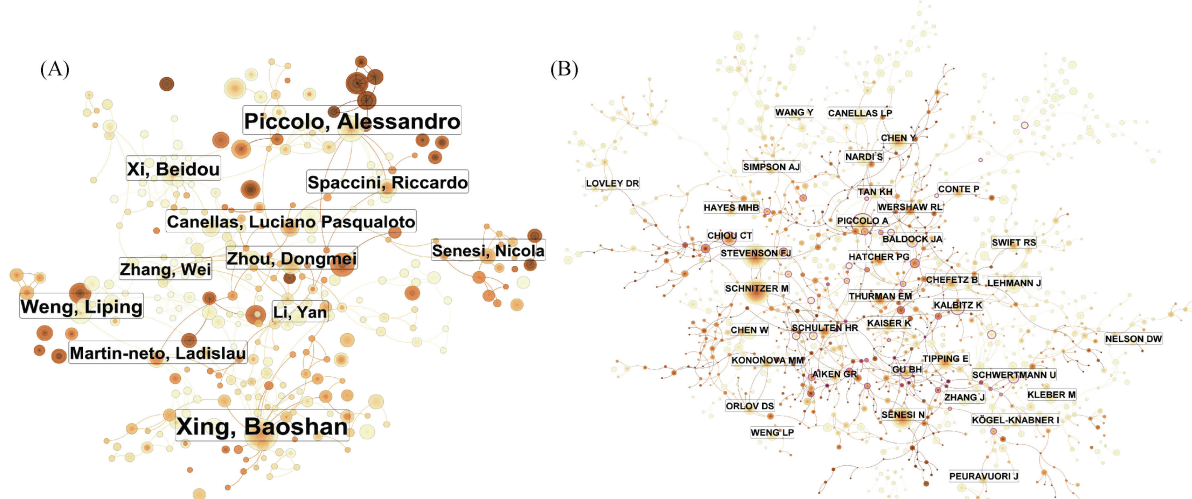


图 4 腐植酸农业应用研究领域的活跃作者网络(A)与共被引作者网络(B)
Fig. 4 Networks of active authors (A) and co-cited authors (B) in the field of humic acid in agricultural applications

表 4 腐植酸农业应用研究领域的前 10 位活跃作者和共被引作者
Table 4 Top 10 active authors and co-cited authors in the field of humic acid in agricultural applications

序号	活跃作者					共被引作者				
	姓名	国家	发文量	中介中心性	突现值	姓名	国家	被引频次	中介中心性	突现值
1	Xing B(邢宝山)	美国	109	0.04	26.23	Schnitzer M	加拿大	1 725		139.68
2	Piccolo A	意大利	66	0.02	7.17	Stevenson F J	美国	1 616		49.49
3	Senesi N	斯洛伐克	52	0.01	17.19	Senesi N	斯洛伐克	1 229		3.49
4	Weng L(翁丽萍)	荷兰	34	0.01	8.24	Piccolo A	意大利	1 193	0.17	
5	Xi B(席北斗)	中国	33		9.73	Chen Y(陈尤纳)	中国	970	0.04	8.83
6	Zhou D(周东美)	中国	25	0.02	9.62	Tipping E	英国	836	0.06	16.54
7	Spaccini R	意大利	24	0.01	6.88	Canellas L P	英国	571	0.03	34.04
8	Martin-neto L	巴西	22	0.01	8.67	Swift R S	澳大利亚	571		12.34
9	Zhang W(张伟)	中国	21	0.01	4.53	Hayes M H B	美国	550	0.01	23.66
10	Canellas LP	英国	20	0.02	9.18	Chiou C T	美国	549	0.15	59.15

2.2 研究热点分析

关键词是文献主要内容和研究主题的高度提炼,通过对高频关键词分析,可鉴别某领域的主要研究路径和热点。由关键词共现网络图谱(图 5)可见,“humic substances”(腐殖质)和“organic carbon”(有机碳)的出现频次居于首位,分别为 1 911 和 1 479,这主要

归因于腐植酸的早期研究与土壤腐殖质紧密相连。早在 1809 年,德国农学家 Albrecht Daniel Thae 就提出了“土壤腐殖质营养学说”,该学说认为土壤肥力完全取决于腐殖质(其核心物质即为腐植酸)的含量^[34]。这一理论为后续围绕腐植酸与土壤肥力关系的研究奠定了重要基础。紧随其后的高频关键词为

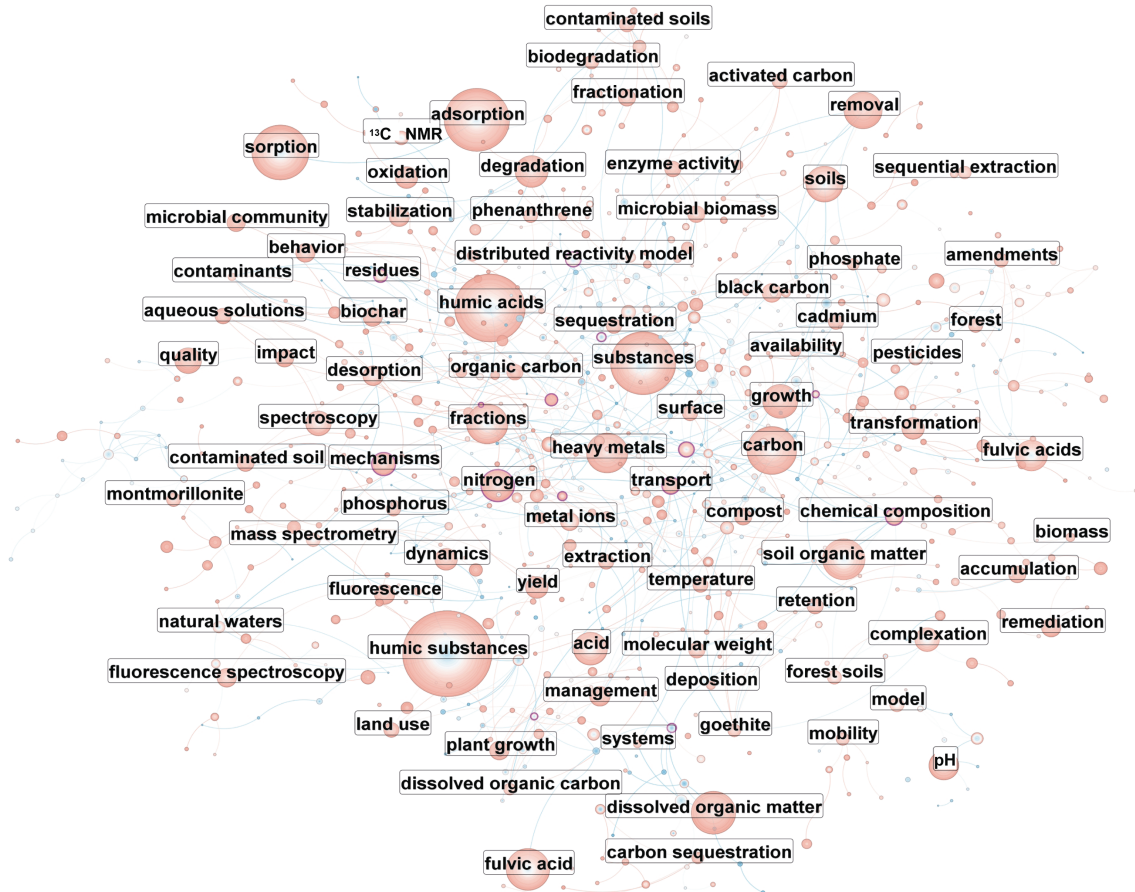


图 5 腐植酸农业应用研究关键词共现知识图谱
Fig. 5 Co-occurrence knowledge graph of core keywords of humic acid in agricultural applications

“adsorption (吸附)” “dissolved organic matter (可溶性有机质)” 以及 “heavy metals (重金属)”，这些关键词充分体现了腐植酸在环境修复领域的重要功能。腐植酸之所以具备这一功能，主要依赖于其独特的化学结构与性质。一方面，腐植酸分子表面带有负电荷，能够与阳离子发生特异性结合；另一方面，腐植酸中富含的羧基、酚羟基、羟基等官能团具有极高的化学活性，能够与其他物质发生化学反应，进而形成稳定的复合物^[35-37]。这种特殊的化学特性使得腐植酸在处理土壤中重金属污染、改善土壤环境质量等方面发挥着关键作用。此外，腐植酸组分分级相关的 “fulvic acid (黄腐酸)” “fractions (组分)” 等关键词，以及腐植酸对作物影响方面的 “growth (生长)” “nitrogen (氮)” 等关键词表明，这些方面同样成为该领域的研究热点。对腐植酸组分进行深入探究，有助于了解不同组分的特性与功能^[38-39]，从而实现腐植酸的精准利用；研究腐植酸对作物生长以及氮素吸收利用^[40-41]等方面的影响，则对于优化农业施肥策略、提高作物产量与品质具有重要意义。

聚类分析能够定量研究关键词的分类和分区问题，可以使用数学方法按照一定的指标确定关键词之间的亲属关系，进而对其聚类。由图 6 和表 5 可知，近 30 年腐植酸农业应用研究的热点主题主要集中在以下几个方面：①腐植酸环境地球化学行为^[42-45]，聚焦于腐植酸在自然环境中的吸附解吸、迁移转化过程

及其与周围污染物(如“polycyclic aromatic-hydrocarbons (多环芳烃)”等)的相互作用机制、关键影响因素(如“ionic-strength(离子强度)” “oxidation(氧化)”等)以及动力学模型的预测(如“distributed reactivity model (分布反应性模型)” “kinetics(动力学)”等)。②腐植酸在土壤修复中的应用^[46-49]，聚焦于利用腐植酸对遭受污染或退化的土壤进行修复与改良，包括对土壤中重金属(如“cadmium(镉)” “copper(铜)”等)的吸附固定、降解转化等(如“remediation (修复)” “immobilization (固定)”等)。实证研究也发现，施用腐植酸可使土壤有效镉含量降低 10.7%~18.5%，减少水稻籽粒镉富集^[50]。不同分子量的腐植酸对土壤镉有效性影响差异显著，小分子量腐植酸对土壤重金属的吸附络合能力更强，可以降低土壤对镉的吸持能力；大分子腐植酸则主要通过吸持和固定作用来降低土壤重金属的迁移性和生物有效性^[51]。③腐植酸分类与性质表征^[38-39]，通过多种技术方法(如“nuclear-magnetic-resonance (核磁共振)” “size-exclusion chromatography(大小排阻色谱)” “particle-size fractions(团聚体分级)”等)深入剖析腐植酸不同类型及其独特的物理化学性质，涵盖化学结构、官能团组成、分子量分布等(如“fractions/components(组分)” “chemical-composition(化学组分)”等)。腐植酸的复杂结构使其具有溶解性、弱酸性、离子交换能力以及生理活性等多重属性，进而使其能够发挥多重改土功能^[26-29]。④腐植酸在农作物生

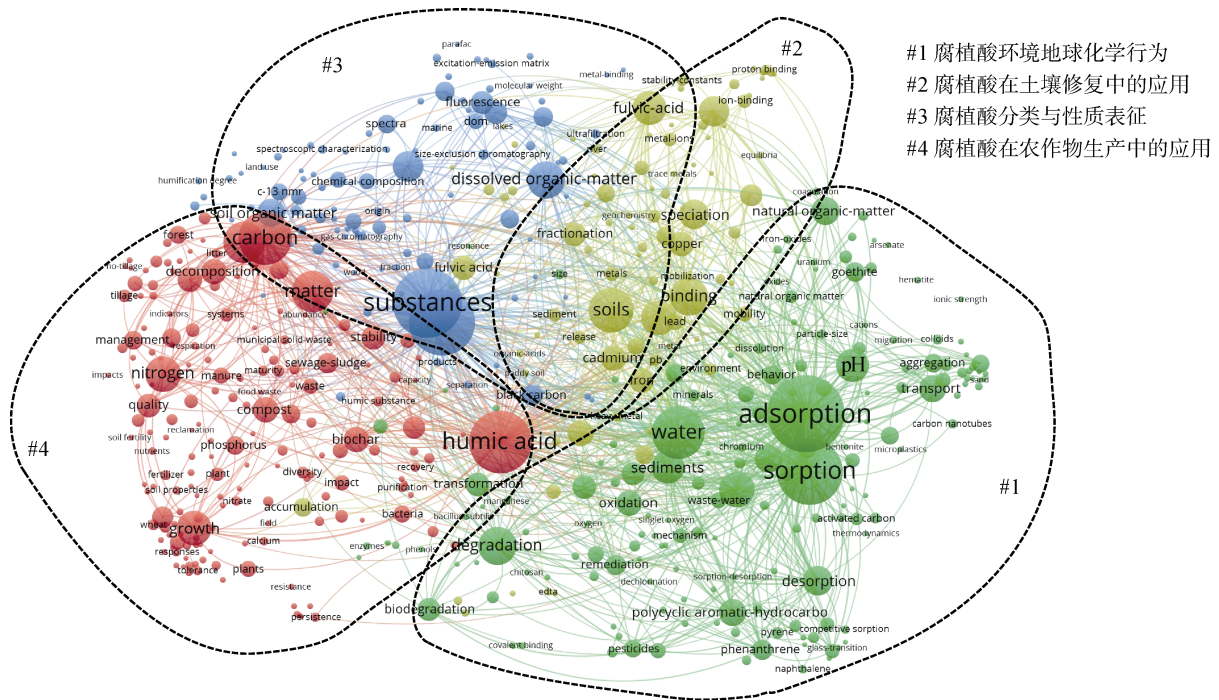


图 6 腐植酸农业应用研究领域论文主题分布
Fig. 6 Global distribution of paper topics of humic acid in agricultural applications

表 5 腐植酸农业应用研究领域论文关键词聚类分类
Table 5 Cluster co-occurrence table of keywords of research on humic acid in agricultural applications

聚类	研究主题	代表关键词
1	腐植酸环境地球化学行为	adsorption(吸附)、desorption(解吸)、transport(转化)、kinetics(动力学)、polycyclic aromatic-hydrocarbons(多环芳烃)、mechanisms(机制)、oxidation(氧化)、toxicity(毒性)、ionic-strength(离子强度)、behavior(行为)、distributed reactivity model(分布反应性模型)、aqueous-solutions(溶剂)
2	腐植酸在土壤修复中的应用	dissolved organic-matter(可溶性有机质)、binding(黏合)、heavy-metals(重金属)、accumulation(积累)、complexation(络合)、bioavailability(生物利用度)、natural organic-matter(自然有机质)、cadmium(镉)、copper(铜)、goethite(针铁矿)、remediation(修复)、phosphate(磷酸盐)、contaminated soil(土壤修复)、immobilization(固定)
3	腐植酸分类与性质表征	substances(物质)、biodegradation(生物降解)、fractions/components(组分)、extraction(提取)、clay-minerals(黏土矿物)、nuclear-magnetic-resonance(核磁共振)、chemical-composition(化学组分)、mass-spectrometry(质谱法)、bacteria(细菌)、size-exclusion chromatography(大小排阻色谱)、particle-size fractions(团聚体分级)、aquatic humic substances(水生腐殖质)
4	腐植酸在农作物生产中的应用	growth(生长)、compost(堆肥)、biochar(生物质炭)、quality(质量)、yield(产量)、sludge(污泥)、phosphorus(磷)、amendments(改良剂)、maize(玉米)、wheat(小麦)、amino-acids(氨基酸)、maturity(成熟期)、rhizosphere(根际)、tolerance(耐受)、microbial community(微生物群落)、nitrate(硝酸盐)、salinity(盐)、nitrate uptake(养分吸收)

产中的应用^[40-41, 52], 主要关注不同来源腐植酸(如“sludge(污泥)”“compost(堆肥)”“biochar(生物质炭)”等)对“wheat(小麦)”“maize(玉米)”等粮食作物以及耐逆作物(如“tolerance(耐受)”“salinity(盐)”等)的积极作用。此外, 腐植酸农业应用研究还考虑了对作物的产量(如“yield(产量)”)、品质(如“nitrate(硝酸盐)”“amino-acids(氨基酸)”等)以及对土壤健康(如“microbial community(微生物群落)”等)的综合影响。例如, Kahn 等^[14]发现, 在保水保肥性能相对较好的黏壤土中应用腐植酸后, 小麦的穗重和籽粒产量相较于在砂壤土中更为优异。张丽丽等^[15]发现, 在高 pH 的碱性土壤中, 腐植酸对番茄产量的提升以及磷素吸收效率的促进效果更为显著, 同时土壤根际微生物群落的多样性也得以增强。综上, 通过对这些高频关键词的系统分析, 能够明确该领域的主要研究方向与热点问题, 为后续研究提供重要的参考依据与研究思路。

2.3 研究前沿与趋势

关键词时区图谱可以反映关键词随时间变化的趋势, 结合突变分析可以研究关键词热度的演替过程, 阐明特定时期潜在话题的关注度^[53]。图 7 所示, 早在 1994 年初期, 腐植酸农业应用研究的关键词就已呈现出丰富多样的态势。其中, “fulvic acid(黄腐酸)”“humus(腐殖质)”“molecular weight(分子量)”“functional groups(官能团)”等关键词, 着重反映了对腐植酸结构功能的研究; “herbicides(除草剂)”“pesticides(杀虫剂)”“pollutants(污染物)”“heavy

metals(重金属)”等关键词, 则体现了腐植酸在去除重金属、农残等环境污染物以及土壤改良方面的研究方向; 而“growth(生长)”“phosphorus(磷)”等关键词, 反映出腐植酸在刺激作物生长和促进养分高效利用方面的研究。结合图 1 和图 7 可知, 该时间段腐植酸农业应用相关研究尚未得到广泛关注, 但研究方向已呈现出百花齐放的局面。

随着时间的推移, 上述各方向的热度不仅并未减退, 反而不断深入发展。在此期间, Schulten 和 Schnitzer^[39]提出了更为复杂且全面的腐植酸结构模型; 随后, Schulten 和 Leinweber^[38]提出了腐植酸胶体的可视化图。表 6 结果也显示, 诸如“nuclear magnetic resonance(核磁共振)”“humic substances(腐殖质物质)”“model(模型)”等反映腐植酸结构研究的关键词, 早在 1994 年便已出现, 且其实现终止年集中在 2001—2008 年。2014 年后, “fertilizer(肥料)”“stress(胁迫)”“China(中国)”“biostimulants(生物刺激素)”“efficiency(效率)”“rice(水稻)”“use efficiency(利用效率)”等关键词受到广泛关注(图 7)。这一现象充分表明, 中国在腐植酸农业应用研究领域的影响力逐渐扩大, 涵盖了大田作物、耐逆作物以及先锋植物等; 同时, 腐植酸作为生物刺激素, 在土壤健康生物网络和作物生长发育中的重要作用也不断被重视。根据《腐植酸复合肥料》标准(T/CHAIA 8—2020)^[23], 腐植酸肥料中水溶性腐植酸(以干基计)含量超过 2% 即符合标准。然而, 这一较低的腐植酸含量意味着其自身提升土壤有机质和肥力的能力有限, 主

要是通过外源有机碳的刺激来增强微生物的功能^[54]，从而调节土壤有机碳的周转，进而提升土壤肥力，快速改善土壤质量。此外，施用腐植酸作为改善障碍性耕地产能的主要手段，亦引发了学界和业界的高度关注。例如，Kaya 等^[41]通过田间试验深入探讨了腐植酸对玉米干旱胁迫和土壤磷胁迫的调控作用，发现“腐植酸+”模式能够显著提高玉米产量。郑延云等^[55]通

过室内培养试验也证实了腐植酸提升新整治耕地土壤中结合态有机碳含量的能力，但需与秸秆等易分解有机物料协同施用，才能更有效地提高新整治耕地土壤的有机质含量和肥力水平。Calvo 等^[40]的研究强调了腐植酸作为生物刺激素，在增强作物营养吸收和抗逆性方面的重要作用。上述研究成果表明，腐植酸在现代农业中具有广阔的应用前景。

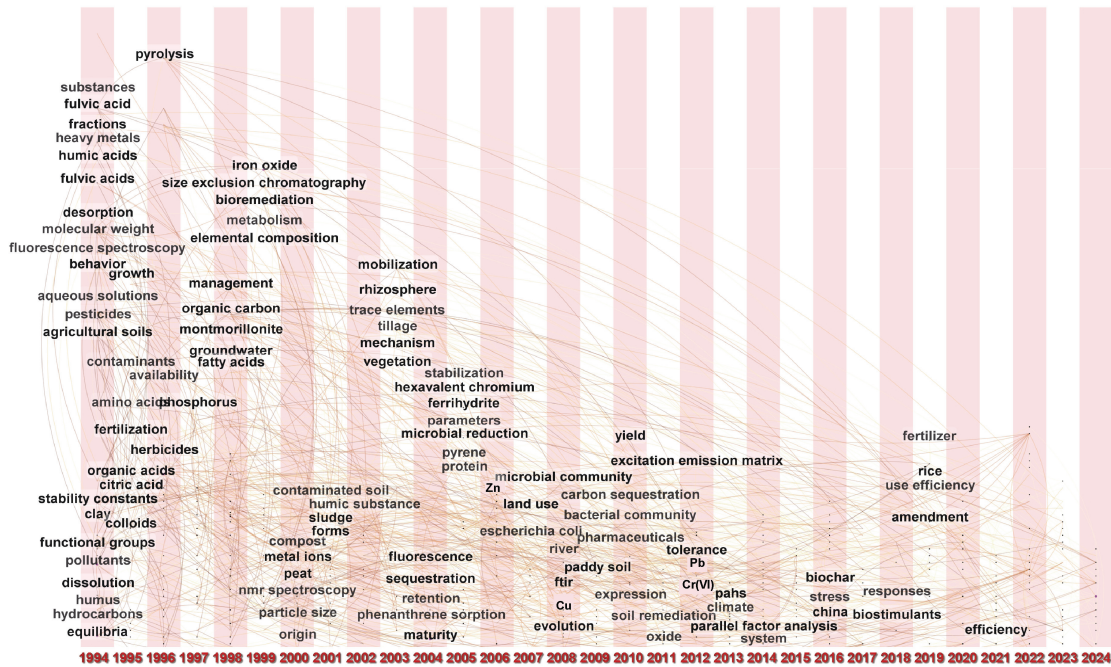


图 7 1994—2024 年腐植酸农业应用研究领域关键词时区图谱

Fig. 7 Keyword time zone map of humic acid in agricultural applications from 1994 to 2024

表 6 1994—2024 年腐植酸农业应用研究领域相关文献关键词排名前 17 位的突现结果

Table 6 Results of top 17 keywords in relevant literatures on humic acid in agricultural applications from 1994 to 2024

关键词	出现起始年	共现强度	突现起始年	突现终止年
nuclear magnetic resonance(核磁共振)	1994	42.53	1994	2008
humic substances(腐殖质物质)	1994	35.49	1994	2001
model(模型)	1994	34.20	1994	2006
sediments(沉积物)	1994	27.58	1994	2006
natural waters(自然水体)	1994	26.68	1994	2004
aluminum(铝)	1994	26.27	1994	2009
stability constants(稳定常数)	1994	22.16	1994	2006
atrazine(阿特拉津)	1996	26.76	1996	2010
particle size fractions(粒径分组)	1996	21.81	1996	2009
distributed reactivity model(分布反应性模型)	1998	36.12	1998	2012
microbial community(微生物群落)	2008	23.27	2018	2024
nanoparticles(纳米颗粒)	2012	20.07	2018	2024
remediation(修复)	2006	22.83	2019	2024
quality(质量)	2003	21.02	2019	2024
impact(影响)	2007	20.80	2019	2024
yield(产量)	2010	35.27	2020	2024
growth(生长)	1995	26.97	2020	2024

此外,“microbial community(微生物群落)”“quality(品质)”“impact(影响)”“yield(产量)”和“growth(生长)”等关键词的突现起始值均在 2018 年以后,这进一步表明,相较于以往对腐植酸性质的研究,腐植酸在农业应用中的综合效益评价以及其与作物生长之间的关系,正逐渐成为新的研究热点。周丽平等^[56]发现,腐植酸的活性功能团对养分的有效性具有双向调控作用,能够影响植物的原生代谢和次生代谢过程,其对植物生长的影响与其结构密切相关。这种影响不仅可以促进作物的养分吸收,还能提高土壤中养分的含量,从而综合调控作物的生长环境,改善作物对养分的吸收、同化和利用状况。综上所述,随着研究的持续深入,腐植酸农业应用研究正从早期侧重于腐植酸结构机理的剖析,逐步向腐植酸农业应用技术的比选以及改良效果的综合评价方向转变。这一转变不仅反映了该领域研究的不断拓展与深化,更为未来的研究指明了方向,即更加注重腐植酸在实际农业生产中的应用效果与价值体现。

3 结论与展望

腐植酸农业应用研究领域的发文数量依次经历了初步探索、快速发展以及井喷式研究发展 3 个阶段。中国的论文发表量位居全球首位,但在国际上的影响力仍有待进一步提高。依据关键词聚类分类,腐植酸环境地球化学行为、腐植酸在土壤修复中的应用、腐植酸分类与性质表征、腐植酸在农作物生产中的应用是该领域的热点主题。腐植酸农业应用研究变化趋势正从单纯的腐植酸性质评价,逐步向应用效果的环境、经济效益综合评价方向不断完善。未来该领域的研究应着重关注腐植酸人工合成制备工艺优化,确保不同批次腐植酸质量的稳定性与一致性,从多种结构表征转变为有目标地合成专用类腐植酸,按需定制提升腐植酸在农业生产中的应用效果。

参考文献:

- [1] Stevenson F J. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions[M]. New York: John Wiley & Sons., 1982.
- [2] 刘康德, 郑平. 煤炭腐植酸的表征[J]. 燃料化学学报, 1980, 8(1): 1-11.
- [3] 许新桥, 刘俊祥. 腐植酸的作用机制及其在林业上的应用[J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 48-52.
- [4] Ampong K, Thilakaranthna M S, Gorim L Y. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health[J]. Frontiers in Agronomy, 2022, 4: 848621.
- [5] Li Y, Fang F, Wei J L, et al. Humic acid fertilizer improved soil properties and soil microbial diversity of continuous cropping peanut: A three-year experiment[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 12014.
- [6] 李会杰. 腐植酸和富里酸的提取与表征研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [7] 张水勤. 不同腐植酸级分的结构特征及其对尿素的调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [8] Billingham K L. Humic products - potential or presumption for agriculture Can humic products improve my soil? [C]//Proceedings of the 27th Annual Conference of The Grassland Society of NSW. Wagga, Australia: The Grassland Society of NSW Inc., 2015.
- [9] Saruhan V, Kusvuran A, Babat S. The effect of different humic acid fertilization on yield and yield components performances of common millet (*Panicum miliaceum L.*)[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(3): 663-669.
- [10] Tahir M M, Khurshid M, Khan M Z, et al. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils[J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 124-131.
- [11] Zandonadi D B, Matos C R R, Castro R N, et al. Alkamides: A new class of plant growth regulators linked to humic acid bioactivity[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2019, 6(1): 23.
- [12] Ore O T, Adeola A O, Fapohunda O, et al. Humic substances derived from unconventional resources: Extraction, properties, environmental impacts, and prospects[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(21): 59106-59127.
- [13] Muscolo A, Sidari M, Nardi S. Humic substance: Relationship between structure and activity. Deeper information suggests univocal findings[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 129: 57-63.
- [14] Khan R U, Khan M Z, Khan A, et al. Effect of humic acid on growth and crop nutrient status of wheat on two different soils[J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41(4): 453-460.
- [15] 张丽丽, 李继蕊, 毕焕改, 等. 不同土壤 pH 和磷水平下黄腐酸对番茄产量和根际土壤微生物生态的影响[J]. 中国蔬菜, 2021(11): 45-52.
- [16] 胡鹏杰, 杜彦谔, 夏冰, 等. 基于 Web of Science 对土壤胶体影响重金属行为研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 445-455.
- [17] 祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 等. 基于 Citespace 软件的生态风险知识图谱分析[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4504-4515.
- [18] 曾宪成. 谈谈腐植酸[J]. 腐植酸, 2001(S1): 6.
- [19] 成绍鑫, 曾宪成. 腐植酸与肥料[J]. 腐植酸, 2001(S1): 41-46.
- [20] Brown coals and lignites - Determination of humic acids: ISO 5073: 2013[S]. International Organization for Standardization, 2013.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 腐植酸原料及肥料 术语: GB/T 38073-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [22] 中华人民共和国农业部. 含腐植酸水溶肥料: NY 1106-2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

- [23] 中国腐植酸工业协会. 腐植酸钾复合肥料: T/CHAIA 8—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [24] 张珂, 厉萌萌, 何明珠. 基于 CiteSpace 和 HistCite 的生态化学计量学国内外文献特征与研究热点分析[J]. 生态科学, 2021, 40(5): 195–205.
- [25] Schnitzer M, Khan S U. Soil organic matter[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [26] Riffaldi R, Schnitzer M. Electron spin resonance spectrometry of humic substances[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(2): 301–305.
- [27] Schnitzer M. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 1999: 1–58.
- [28] Schnitzer M, Ortiz de Serra M I, Ivarson K. The chemistry of fungal humic acid-like polymers and of soil humic acids[J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(2): 229–236.
- [29] Schulten H R, Schnitzer M. The chemistry of soil organic nitrogen: A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 26(1): 1–15.
- [30] Goh K M, Stevenson F J. Comparison of infrared spectra of synthetic and natural humic and fulvic acids[J]. Soil Science, 1971, 112(6): 392–400.
- [31] Kelley K R, Stevenson F J. Forms and nature of organic N in soil[J]. Fertilizer Research, 1995, 42(1): 1–11.
- [32] Stevenson F J. Nature of divalent transition metal complexes of humic acids as revealed by a modified potentiometric titration method[J]. Soil Science, 1977, 123(1): 10–17.
- [33] Stevenson F J. Stability constants of Cu^{2+} , Pb^{2+} , and Cd^{2+} complexes with humic acids[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 665–672.
- [34] 自由路. 植物营养中理论问题的追本溯源[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 1–10.
- [35] 邓迎璇, 翁莉萍, 朱桂芬. 腐殖质对土壤砷形态分布及转换影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(2): 190–201.
- [36] Khan S U. Adsorption of pesticide by humic substances. A review[J]. Environmental Letters, 1972, 3(1): 1–12.
- [37] Senesi N. Binding mechanisms of pesticides to soil humic substances[J]. Science of the Total Environment, 1992, 123: 63–76.
- [38] Schulten H R, Leinweber P. New insights into organic-mineral particles: Composition, properties and models of molecular structure[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(5): 399–432.
- [39] Schulten H R, Schnitzer M. A state of the art structural concept for humic substances[J]. Naturwissenschaften, 1993, 80(1): 29–30.
- [40] Calvo P, Nelson L, Klopper J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. Plant and Soil, 2014, 383(1): 3–41.
- [41] Kaya C, Şenbayram M, Akram N A, et al. Sulfur-enriched leonardite and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in maize (*Zea mays* L.)[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 6432.
- [42] Johnson M D, Keinath T M, Weber W J. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 14. Characterization and modeling of phenanthrene desorption rates[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(8): 1688–1695.
- [43] Komy Z R, Shaker A M, Heggy S E M, et al. Kinetic study for copper adsorption onto soil minerals in the absence and presence of humic acid[J]. Chemosphere, 2014, 99: 117–124.
- [44] Shaker A M, Komy Z R, Heggy S E M, et al. Kinetic study for adsorption humic acid on soil minerals[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2012, 116(45): 10889–10896.
- [45] 方文雯, 李晓宁, 吴仕希, 等. 腐殖酸对 *Mycobacterium* sp. NJS-1 降解芘的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 164–174.
- [46] Clemente R, Bernal M P. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids[J]. Chemosphere, 2006, 64(8): 1264–1273.
- [47] Conte P, Agretto A, Spaccini R, et al. Soil remediation: Humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2005, 135(3): 515–522.
- [48] Haderlein A, Legros R, Ramsay B. Enhancing pyrene mineralization in contaminated soil by the addition of humic acids or composted contaminated soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 56(3): 555–559.
- [49] Yang T, Hodson M E. Investigating the use of synthetic humic-like acid as a soil washing treatment for metal contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 290–300.
- [50] 曹雲清, 徐晓燕, 韩磊, 等. 全生育期淹水联合钝化材料对重度 Cd 污染下水稻生长和镉富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2498–2506.
- [51] 吴洪燕, 李清君, 陈士更, 等. 不同分子量腐植酸的结构特征及其对土壤镉有效性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1233–1239.
- [52] 魏世平, 吴萌, 李朋发, 等. 腐殖酸对花生连作地土壤真菌群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 846–856.
- [53] 吴胜男, 王晓锋, 刘婷婷, 等. 基于 CiteSpace 的湿地恢复研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1224–1239.
- [54] 马志伟, 张丛志, 赵占辉, 等. 基于木本泥炭的土壤健康培育研究进展[J]. 生态环境学报, 2024, 33(12): 1964–1977.
- [55] 郑延云, 余正洪, 张佳宝, 等. 腐殖酸-水铁矿复合物提升新整治耕地土壤有机碳的效应[J]. 土壤, 2024, 56(6): 1184–1191.
- [56] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 334–343.

(责任编辑: 于 飞)