

基于文献计量的土壤溶质运移可视化分析

陈继虹¹, 贾振江¹, 李王成^{1,2,3*}, 王洁¹, 穆敏¹, 牛宵宵¹, 吕航¹

(1.宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 3.省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021)

摘要: 【目的】系统分析国内外土壤溶质运移领域的研究现状, 探究其研究热点与未来发展趋势。【方法】基于 Web of Science 核心数据库 (WoS) 和中国知网数据库 (CNKI), 借助 CiteSpace 和 VOSviewer 可视化软件, 从发文数量、发文国家、发文机构、文献来源、学科分布和关键词着手, 对 2003—2022 年国内外土壤溶质运移研究进行可视化分析。【结果】①国内外土壤溶质运移研究总体呈上升趋势, 且英文的发文数量多于中文。其中, 中国和美国在该领域占据主导地位。②在发文量前 10 的机构中, 中国仅有中国科学院, 美国则有 4 家。此外, 国内机构间的合作较为松散, 而全球相关机构间的国际合作较为紧密。③该领域刊出的主要英文期刊有《Journal of Hydrology》《Vadose Zone Journal》《Water Resources Research》, 主要中文期刊则为《灌溉排水学报》《水土保持学报》《节水灌溉》。④土壤溶质运移研究主要聚焦环境科学、水资源学和农业学等学科领域, 且各学科间的知识内容具有交互性。⑤国内在该领域研究的主要关键词为“重金属”、“水盐运移”和“重金属迁移”, 国外则为“solute transport”、“transport”和“water”。【结论】土壤溶质运移仍然是未来的研究热点, 今后可从以下几点入手: 生态系统中重金属或污染物的迁移转化; 土壤溶质运移的尺度效应; 农田灌排和耕作模式下的生态环境效应; 考虑多因素影响的土壤溶质运移和作物生长耦合模型建立; 土壤改良剂的筛选和集成应用示范。

关键词: 土壤溶质运移; VOSviewer; CiteSpace; 研究进展; 知识图谱

中图分类号: S152.7²

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023127

OSID: 

陈继虹, 贾振江, 李王成, 等. 基于文献计量的土壤溶质运移可视化分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 119-128.

CHEN Jihong, JIA Zhenjiang, LI Wangcheng, et al. Visualization of Soil Solute Transport Research: A Bibliometrics Analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 119-128.

0 引言

【研究意义】土壤溶质运移是指溶解于土壤水溶液中的物质 (污染物、可溶性盐类、农药、肥料等) 随土壤水分运动而迁移的过程^[1]。土壤溶质运移作为土壤圈中重要的物质循环过程, 对生态系统健康至关重要。一方面, 土壤溶质运移可为植物根系输送养分, 促进作物生长发育^[2]; 另一方面, 人类活动排放的生活污水和工业废水等经由土壤运移至地下水层, 对土壤健康和地下水安全构成严重威胁^[3]。因此, 土壤溶质运移在近几年间一直都是农业学、土壤学、水文学和生态学等学科的研究热点^[4]。【研究进展】目前, 国内外土壤溶质运移的研究主要集中在模拟试验开展^[5-6]、重金属或污染物的迁移转化^[7-9]、土壤水分运

动^[10-11]和盐分运移^[12-13]、模型参数的优化求解方法^[14]或数值模拟^[15-16]等方面。20 世纪 60 年代初, Nielson 等^[17]和 Biggar 等^[18]共同提出了易混合置换理论, 系统地阐述了土壤溶质运移过程中对流、扩散和弥散效应的耦合作用, 并建立了对流-弥散方程 (CDE 方程), 在土壤溶质运移研究历程中具有里程碑意义。在此之后, 为了进一步修正 CDE 方程, 进而提高理论模拟精度, 土壤溶质运移的两区模型应运而生^[19]。而为了考虑土壤中不动水体的存在并合理描述土壤优先流过程, 更多的学者则在两区模型的基础上提出了多种优先流模型^[20]。随着信息技术的发展, 土壤溶质运移研究经历了从理论研究到模型模拟、从基础试验到田间尺度^[21]、从宏观效应到微观孔隙^[22]的逐步完善, 并在 CDE 方程的基础上发展出众多的模型软件, 如 HYDRUS 模型^[23-24]、SWAP 模型^[25]和 WAVE 模型^[26]等, 这极大地推动了相关领域的科学研究。【切入点】近年来, 诸多学者已在土壤溶质运移领域开展了大量理论与试验研究工作, 但关于其的系统梳理和可视化分析鲜有报道。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本文基于 Web of Science 核心数据库 (WoS) 和中国知网数据库 (CNKI), 通过 CiteSpace^[27]和 VOSviewer^[28]

收稿日期: 2023-03-27 修回日期: 2023-06-11 网络出版日期: 2023-08-04
基金项目: 国家自然科学基金项目 (52169010); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900600); 宁夏自然科学基金重点项目 (2021AAC02008); 宁夏重点研发计划项目 (2019BEH03010); 宁夏高等学校一流学科建设 (NXYLXK2021A03); 宁夏大学研究生创新项目 (CXXM2023-15)
作者简介: 陈继虹 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 2215081124@qq.com
通信作者: 李王成 (1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liwangcheng@126.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

软件,对 2003—2022 年国内外土壤溶质运移领域的发文数量、发文国家、研究机构、学科分布以及关键词聚类等内容进行计量统计分析,并探讨其研究热点、研究前沿和未来发展趋势,旨在全面了解溶质在土壤-地下水-生物体系的迁移转化规律,以期为土壤健康调节和生态环境保护提供借鉴和启迪。

1 材料与方法

1.1 数据来源

英文文献选自 Web of Science 核心数据库 (WoS),引文索引设为“SCI--EXPANDED--1999--至今”,以“TS=(Soil solute transport OR Organic matter and Water pollutants and Relocation OR Agricultural fertilizers and Relocation OR Soil heavy metals and Relocation OR Soil water-salt transport OR Groundwater and Pollutant transport)”为主题词进行检索。时间设置为 2003 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日,检索结果为 5 034 篇。为提高检索精度,筛选数据类型为“Article”和“Review”,语种选择“English”,最终获到 4 958 篇文献。中文文献则取自于中国知网数据库 (CNKI),利用高级检索功能以“土壤溶质运移+反应性溶质运移+物质迁移”或“有机物+水体污染物+化学物质+迁移”或“农业肥料+迁移”或“土壤重金属+迁移”或“土壤水盐运移”或“地下水+污染物运移”为主题进行检索,时间范围为 2003 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日,检索范围设为“总库”,筛选数据类型为“学术期刊”和“学位论文”,共检索到 2 787 篇文献。

1.2 研究方法

CiteSpace 软件在揭示学科动态发展规律和研究前沿方面具有显著优势;VOSviewer 软件则更善于处理大规模数据。同时,二者均具备提供研究机构合作分析和关键词共现分析等功能^[27-28]。因此,本文基于上述两款软件绘制土壤溶质运移研究领域的发文机构合作关系网络和关键词聚类图谱,同时结合关键词突发性检测,旨在对当前研究进行系统归类并从中寻求当前研究热点和未来发展趋势。此外,年度发文量、发文国家、发文机构、文献来源、学科分布和高频关键词分布等则借助 Microsoft Excel 2016 进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 统计结果和数据分析

2.1.1 发文数量分析

对 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中检索出的文献进行发表情况和发文趋势分析 (图 1)。在 2003—

2022 年,国内外土壤溶质运移领域的发文数量总体均呈逐步上升趋势。这表明,近年来学者们对土壤溶质运移的研究与关注更加深入和突出。然而,相较于中文文献,英文文献的发文数量始终处于领先地位,这可能与该领域研究在国际上深厚的理论基础和起步较早的优先条件等密切相关。尽管如此,进一步对二者的发文数量进行线性拟合不难发现,中文文献的增长率 ($k=11.23$) 明显高于英文文献 ($k=9.26$),这表明,我国土壤溶质运移研究正处于迅速发展阶段。

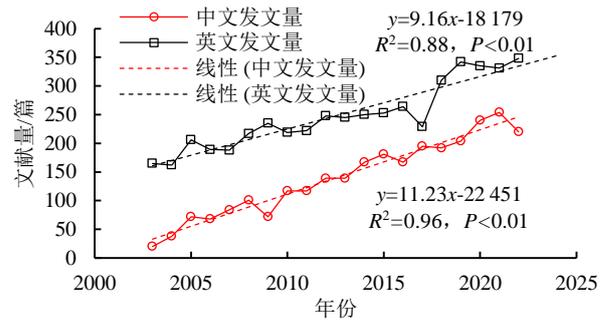


图 1 2003—2022 年土壤溶质运移领域 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库年度文献分布和发文趋势

Fig.1 Literature distribution and publication trend of WoS core database and CNKI database in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

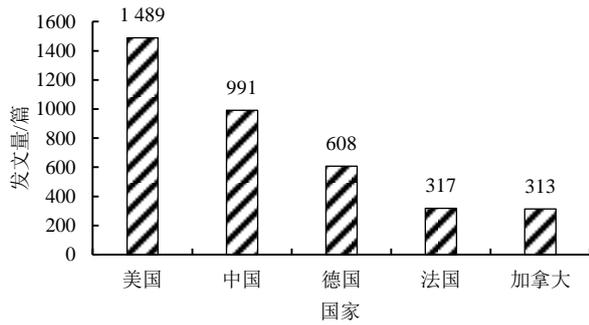
2.1.2 发文国家分析

SCI 的检索结果能够客观地评价个人乃至整个国家或地区的科研成果和水平^[29]。如图 2 (a) 所示,在 2003—2022 年,在土壤溶质运移方面发文总量排名前 5 的国家依次为:美国 (1 489 篇)、中国 (991 篇)、德国 (608 篇)、法国 (317 篇) 和加拿大 (313 篇)。可见,中国和美国在该领域的研究占据主导地位。而从各个国家的发文趋势来看 (图 2 (b)),美国在土壤溶质运移领域研究基础深厚,发文数量亦占优;中国虽起步较晚,但发文量呈逐年增长态势,特别是 2018 年《土壤污染防治法》的出台,使我国的土壤污染防治工作迈向了新征程,亦有效推动了科研人员对土壤溶质运移研究的积极性,这使得中国在该领域的发文数量在 2018 年首次超过美国并在之后常年保持领先地位。至 2022 年时,中国的年度发文数量已达 156 篇,占比 44.83%;美国则为 69 篇,仅占比 19.83%。此外,德国、法国和加拿大在此期间的排名虽有变动,但仍可居前 5。

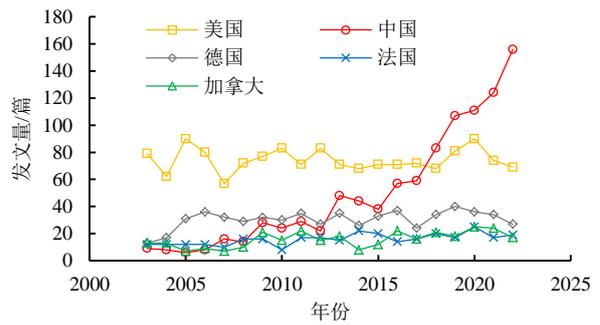
图 3 全面展现了各个国家之间的发文数量、合作关系及其文章影响力。其中,节点大小代表文章数量,连线表示合作关系,紫色外圈则表示该国家的中介中心性值大于 0.1,并可表征其在土壤溶质运移领域的国际影响力^[30]。由表 1 可知,美国的中介中心性最高 (0.31),尽管中国近几年的发文数量剧增,但中介

中心性仍小于德国和法国，这充分表明，我国在土壤溶质运移方面的研究虽较为活跃，但所发文章的

国际影响力有待提高，研究成果的创新性仍需进一步加强。



(a) 总发文量排名前 5 的国家



(b) 各国在不同时段内的发文情况

图 2 2003—2022 年土壤溶质运移领域主要发文国家的 SCI 论文数量分布

Fig.2 Distribution of SCI papers from major publishing countries in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

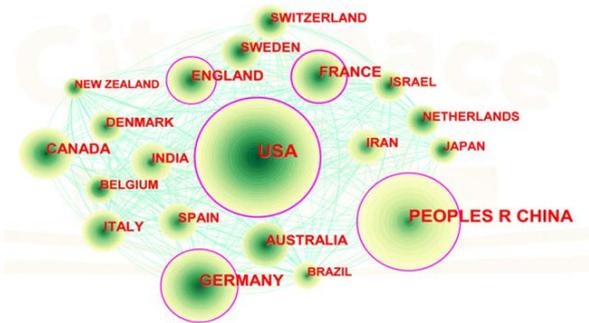


图 3 2003—2022 年土壤溶质运移领域主要发文国家影响力

Fig.3 Impact map of major publishing countries in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

的发文机构分别是 University of California (264 篇)、Helmholtz Association (229 篇)、Chinese Academy of Sciences (218 篇)、United States Department of Agriculture (159 篇) 以及 Centre National De La Recherche Scientifique (157 篇)。而在发文量前 10 的研究机构中，中国只有中国科学院 1 家，美国则有 4 家，分别为加利福尼亚大学、美国农业部、美国能源部和加利福尼亚大学河滨分校。同时不难看出，该领域的国际合作较为紧密，极大促进了相关学科的发展和建设。

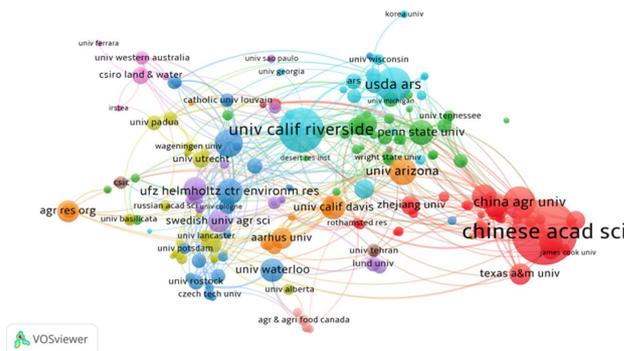
2.1.3 发文机构分析

WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中土壤溶质运移领域研究机构的合作网络关系见图 4。全球涉及层面的研究机构共有 3 607 所，通过调整“Minimum number of documents of an organization=10”阈值，最终筛选出 244 所机构（图 4 (a)）。其中，排名前 5

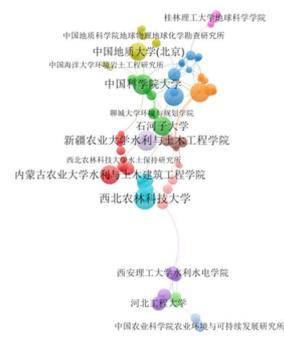
表 1 主要发文国家的中介中心性

Table 1 Intermediary centrality of major publishing countries

序号	国家	中介中心性
1	美国	0.31
2	法国	0.24
3	德国	0.19
4	中国	0.16
5	英国	0.16



(a) WoS 核心数据库



(b) CNKI 数据库

图 4 2003—2022 年土壤溶质运移领域 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库发文机构知识图谱

Fig.4 Publishing organization of WoS core database and CNKI database in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

国内涉及土壤溶质运移方向的研究机构共有 2 346 所，通过调整“Minimum number of documents of an organization=3”阈值，最终筛选出 287 所机构（图 4 (b)）。其中，该领域的主要研究机构为西

安理工大学、石河子大学、新疆农业大学、中国科学院大学、西北农林科技大学和内蒙古农业大学。其余发文机构则是在主要核心机构的基础上延伸开展而来，且各机构间联系薄弱、合作松散。

2.1.4 文献来源分析

对 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库纳入的文献进行出版来源分析, 见图 5。整体来看, 国内期刊的发文数量远少于国外。其中, 英文文献发文量排名前 3 的期刊分别是《Journal of Hydrology》(影响因子/JCR 分区: 6.708/Q1)、《Vadose Zone Journal》(影

响因子/JCR 分区: 2.945/Q3) 和《Water Resources Research》(影响因子/JCR 分区: 6.159/Q1); 相应的中文期刊则是《灌溉排水学报》《水土保持学报》和《节水灌溉》。可见, 该领域的研究成果具有影响力和权威性。

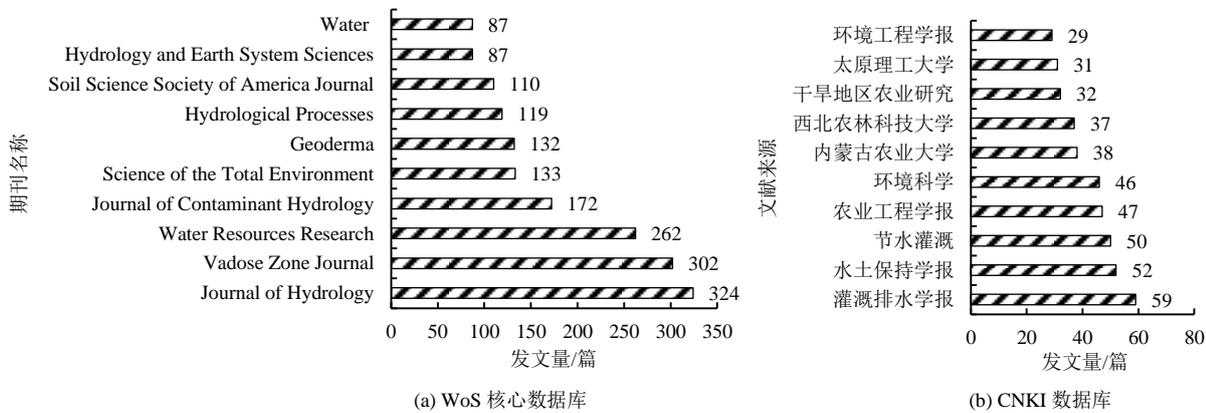


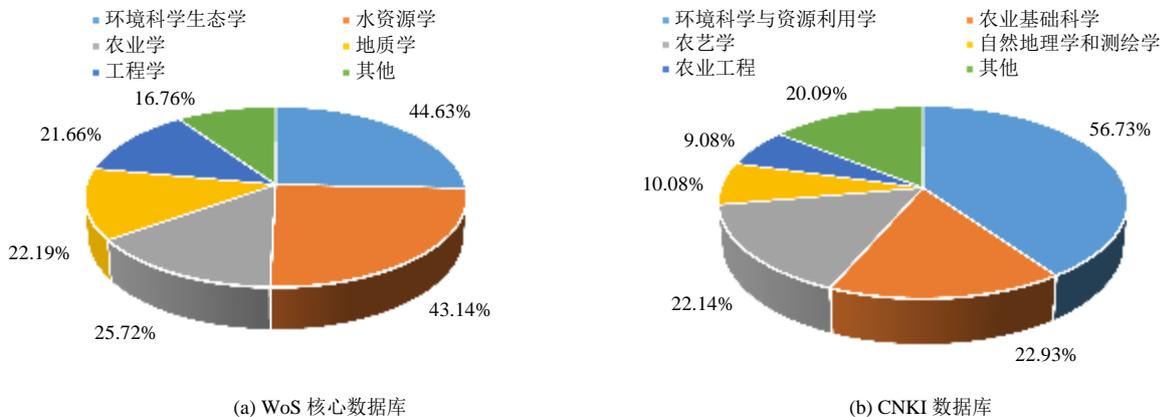
图 5 2003—2022 年土壤溶质运移领域 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中发文量排名前 10 的期刊

Fig.5 Top 10 journals in terms of number of articles published of WoS core database and CNKI database in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

2.1.5 学科分布分析

WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中该领域的学科分布见图 6。由图 6 可看出, 土壤溶质运移研究涉及的学科较为广泛, 且各学科间的交互性较强。其中,

英文文献涉及最多的学科为环境科学生态学、水文学和农业学, 分别占比 44.63%、43.14%和 25.72%; 而中文文献方面则是以环境科学与资源利用学以及农业基础科学为主, 分别占比 56.73%和 22.93%。



注 由于统计和计算过程中不同学科存在交叉, 故其论文占比总和并不等于 100%。

图 6 2003—2022 年土壤溶质运移领域 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中研究学科分布

Fig.6 Research disciplines distribution of WoS core database and CNKI database in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

2.2 国内外的热点和前沿分析

2.2.1 国内外研究热点知识图谱

研究热点是指在某个时段里关联密切且数量众多的学术文献所探讨的学问或专题^[31], 而频次较高的关键词则可在一定程度上被视为该领域的研究热点^[32]。WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中该领域的高频关键词分布见图 7。其中, 英文文献中的主要高频关键词为“solute transport”、“transport”和“water”, 侧重于土壤和水流层面的试验及模型研究。而中文文献中的高频关键词则主要是“重金属”、“水盐运移”、

“重金属迁移”, 更侧重于土壤盐渍化和重金属污染等生态环境问题。

利用 VOSviewer 软件分别对 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中经阈值筛选后的关键词进行聚类分析(图 8), 图中节点的大小表示关键词共现频次的高低, 节点间的连线多少则表示关键词之间的联系紧密程度。

外文文献的关键词主要分为 4 类: 聚类 1 主要包括土壤溶质运移的运动方式、运移规律和数值模拟; 聚类 2 主要体现在农田灌溉方式对根区土壤水盐动

态以及作物产量效应的影响研究；聚类 3 主要为流域尺度上的土壤溶质迁移、周转过程及其根源追溯；聚类 4 则主要是土壤中污染物的迁移、吸附和富集。

中文文献的关键词则主要分为 3 类：聚类 1 主要包括土壤或土壤-植物系统中的重金属迁移转化规律

及其健康风险评价；聚类 2 主要为土壤-地下水系统中的污染物迁移数值模拟及其预测；聚类 3 则主要是灌溉水质、灌排方式或覆盖条件对土壤水盐或水氮的运移规律及其合理调控。

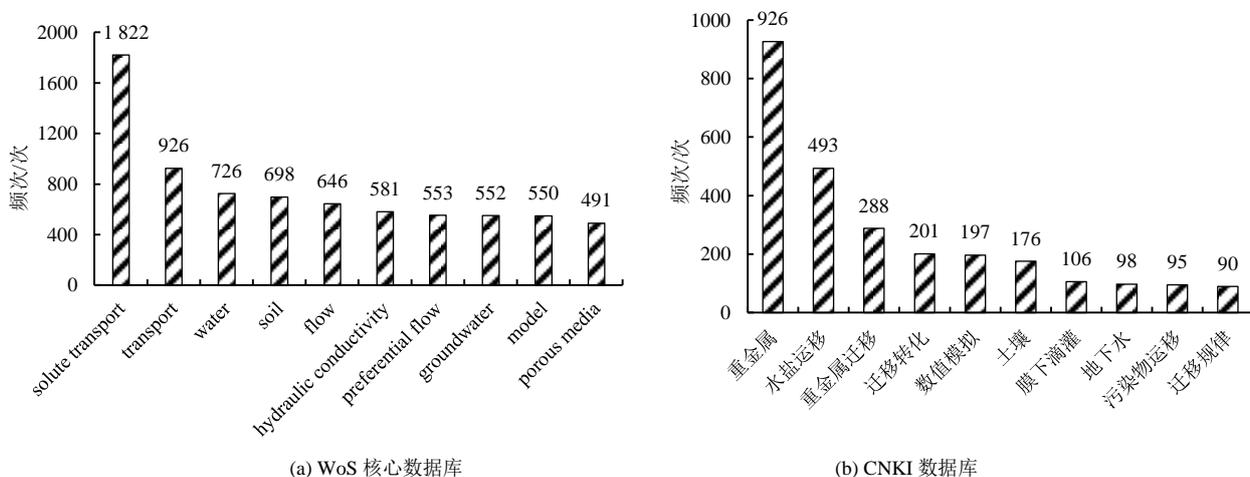


图 7 2003—2022 年土壤溶质运移领域 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中高频关键词分布

Fig.7 High-frequency keywords of WoS core database and CNKI database in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

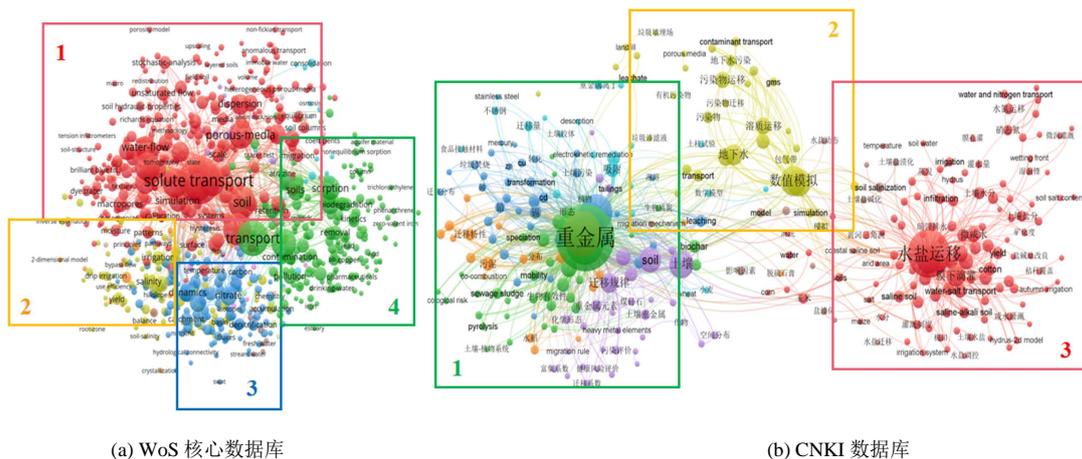


图 8 2003—2022 年土壤溶质运移领域 WoS 核心数据库和 CNKI 数据库中关键词聚类视图

Fig.8 Keyword clustering view of WoS core database and CNKI database in the field of soil solute transport from 2003 to 2022

2.2.2 国内外研究前沿及发展趋势

突变词是指短时间内使用频率骤增的关键词，是了解和发现相关领域研究热点和学术动态的有效途径^[33]。突现强度则表示该研究领域某一关键词在其突现时段内出现频次的权重。一般的，以突现强度高且突现年份近的关键词作为该领域的研究前沿^[34]。由于国内外相关文献中引用频次突增的关键词较多，本文按照突现起始年份进行排序，并最终选取排名前 10 的突变关键词，分别见表 2 和表 3。

由表 2 可知，中文文献中关键词的突现状况是从理论分析到实际应用的渐进过程，现在的研究态势对缓解土壤污染和次生盐碱化等生态问题提供了全新的调控思路。21 世纪初期，国内学者主要通过物理模拟试验探讨土壤水盐运移规律和污染物迁移特征，

并通过建立数学模型对其进行模拟预测。到 2010 年左右，为进一步提高农业用水效率，发展绿色高效的农业节水模式，节水灌溉方式开始备受瞩目，其中，“膜下滴灌”技术由于其增温保墒、抑盐压碱等的生态功效而倍受推崇和发展^[35-36]，其在 2009—2012 年间的突现强度高达 6.13。在此之后，土壤溶质运移的理论研究与实际应用结合愈加紧密，学者们主要关注不同灌溉方式或灌溉定额以及水肥耦合等条件下的土壤水盐运移特性和作物产量效应。近年来，在气候变化和土地退化背景下，土壤改良剂，特别是“生物炭”在土壤修复^[37-39]和微生物健康调控^[40]方面有着优良的应用前景，其在 2018—2022 年间的突现强度升至极值（6.82）。

表 2 中文文献中关键词的突发性检测结果
(按突现起始年份排序)

Table 2 Keywords burst detection results in Chinese literature
(Sorted by the beginning year of burst)

序号	关键词	年份	突现强度	开始	结束	2003—2022 年
1	模型	2004	3.47	2004	2007	-----
2	水盐运移	2004	3.23	2004	2009	-----
3	污染物	2004	3.05	2004	2007	-----
4	膜下滴灌	2004	6.13	2009	2012	-----
5	迁移率	2013	4.91	2013	2017	-----
6	灌水量	2014	3.34	2014	2017	-----
7	产量	2007	4.63	2016	2020	-----
8	水盐分布	2016	3.76	2016	2022	-----
9	盐碱地	2011	4.05	2017	2022	-----
10	生物炭	2017	6.82	2018	2022	-----

注 研究时段为 2003—2022 年, 每条线段代表 1 年。其中, 红线表示突现年份, 黑线则表示普通年份, 下同。

表 3 英文文献中关键词的突发性检测结果
(按突现起始年份排序)

Table 3 Keywords burst detection results in English literature
(Sorted by the beginning year of burst)

序号	关键词	年份	突现强度	开始	结束	2003—2022 年
1	非饱和流	2003	15.85	2003	2012	-----
2	土柱	2003	9.56	2003	2009	-----
3	氯化物	2003	8.11	2003	2009	-----
4	溴化物	2003	4.51	2003	2010	-----
5	阳离子交换	2003	4.24	2003	2009	-----
6	非饱和多孔介质	2005	6.07	2005	2011	-----
7	离子强度	2014	7.02	2014	2020	-----
8	流域	2015	7.08	2015	2022	-----
9	气候变化	2011	5.98	2015	2022	-----
10	侵蚀	2003	11.76	2016	2022	-----

而在外文文献中, “非饱和流”、“土柱”和“氯化物”在 21 世纪初期具有较高的突现强度。这是因为国外在土壤溶质运移方面的研究起步较早且有着长期的积累。早在 1805 年, Fick 就提出分子扩散定律^[41]; 而国内从 20 世纪 70 年代末才开启以石元春^[42]和贾大林等^[43]为代表的土壤溶质运移研究进程。近年来, “流域”尺度、“气候变化”和“侵蚀”等关键词的爆发持续时间较长。特别的是, “侵蚀”在 2009—2012 年间的突现强度最为明显(11.76)。极端气候频发(干旱、洪涝、高温等)和人类活动扰动加剧土壤侵蚀的发生^[44], 而侵蚀和土壤溶质运移研究各有侧重而又彼此联系。侵蚀则主要通过影响土壤物理、化学和生物学过程进而改变其溶质运移动态^[45]。这表明, 现阶段国外在该领域的研究不仅局限于表观层面的土壤溶质运移探析, 而是逐渐拓展至全球尺度的土壤生

态系统物质循环。

3 讨论

目前, 国内外学者在土壤溶质运移领域已取得丰硕成果, 相关的理论方法与模型预测逐渐完善, 研究方法与研究深度不断提升。然而, 土壤圈作为地圈-生物圈系统的一个重要组成部分, 当前土壤环境现状不容乐观, 整个地球生态系统也将受到深刻影响。在此背景下, 今后的研究应该重点关注以下几点:

1) 生态系统中重金属或污染物的迁移转化。随着工农业的迅猛发展, 废弃物的随意填埋或焚烧、污染物的不合理排放等人类活动致使大气、土壤、地下水和植物系统中的重金属或污染物富集或超标^[46]。其中, 土壤中的重金属污染源主要有农药或肥料残留、工业废水排放以及大气沉降等^[47]。由于重金属进入土壤后会发生吸附-解吸^[48]和离子交换^[49]等过程, 进而对其的迁移转化过程形成阻滞效应, 长此以往致使重金属在土壤中高度富集。因此, 植物根系在吸收重金属后, 其产量和品质显著降低, 并对人体健康构成潜在威胁^[50-51]; 此外, 水体中的重金属则主要经由地表径流等方式汇集, 并通过发生物理化学反应逐渐在沉积物中累积。然而, 当前的研究主要聚焦单一化的重金属迁移转化机理, 而关于多源污染物和多维界面的复杂污染过程还有待深入开展^[52]。因此, 还需进一步探明复合生态系统中的重金属迁移转化路径, 构建、优化和完善相关理论模型, 并建立基于多介质界面污染过程的土-气-水-生综合调控模式, 以期为土壤或水体的重金属污染防治提供理论和技术支撑。

2) 土壤溶质运移的尺度效应。土壤环境在物理、化学及人类活动等诸多因素的共同作用下往往呈现出高度的空间异质性以及明显的尺度效应^[53-54]。在空间尺度上, 土壤溶质运移研究是了解和解决某一地区的污染情况和盐渍化程度的关键; 在剖面尺度上, 地下水-土壤系统中的地下水运动和土壤的垂向空间异质性极大影响了溶质在土壤剖面中的分布^[55-56]。然而, 目前的研究多集中于干旱、半干旱的内陆地区^[57-58], 而针对滨海地区的研究还有待加强。尽管如此, 但当前的研究对象多为单一变量, 而针对多种环境因子(地下水埋深、地表覆盖度、灌溉水矿化度等)下的土壤溶质运移机制, 同时, 考虑宏观到微观的多尺度结合仍需进一步地深入探究。

3) 集成考虑生态环境效应的农田灌排和耕作模式。不合理的农田灌溉和耕作会导致土壤退化, 特别是土壤次生盐碱化的发生, 进而引起作物产量和品质的下降, 最终打破农田的生态环境平衡。因此, 在水资源短缺的情况下, 建立节水灌溉和土壤改良的灌排

制度,构建区域水资源-土壤-作物-生态协同发展的调控体系,对绿色、低碳、有机的现代化农业的可持续发展尤为关键。

4) 开发建立集多影响因素的土壤溶质运移和作物生长耦合模型。溶质运移是影响作物产量和品质的主要因素,尤其在盐渍化较为严重的地区,土壤水盐运动研究是盐碱改良和增产提效的基础和前提。目前,现有的土壤溶质运移与作物生长耦合模型主要有SWAP-EPIC、HYDRUS-EPIC等,但其对土壤盐分胁迫的响应效果不佳^[59]。由于作物生长发育过程的复杂性,特别是受气象因子、土壤特性、微生物环境以及田间管理措施等的多重影响,模型耦合结果尚存在不确定性和不稳定性。随着全球气候变暖和极端气候事件的频发,作物的生长发育、产量品质经受巨大挑战和考验^[60]。因此未来应重点结合农业气象因子的动态检测和风险评估,建立基于土壤溶质运移响应的作物生长模型,构建集作物生长、气象预报、土壤水盐调控和遥感监测为一体的预测预警模式。

5) 土壤改良剂的筛选和集成应用示范。随着“土十条”的颁布,我国的土壤环境治理快速发展,土壤改良剂由于其对重金属和污染物的优良吸附特性和对土壤微环境的调节性能在土壤污染和盐碱化治理方面而备受瞩目^[61]。尽管如此,改良剂在农业中的实际应用仍存在诸多不确定性^[62],高昂的生产成本以及潜在的负面环境效应限制其的进一步推广应用。因此,土壤改良剂的试验筛选和集成应用仍是今后的研究重点。

4 结论

1) 2003—2022年间的土壤溶质运移研究总体呈上升趋势,但英文文献的发文数量多于中文。该领域在国内的研究起步较晚,但发展迅速,特别是在2018年以后逐步占优;国内机构间的合作较为松散,而全球相关机构间的国际合作较为紧密;刊出的主要中英文期刊分别为《Journal of Hydrology》《Vadose Zone Journal》《Water Resources Research》《灌溉排水学报》《水土保持学报》《节水灌溉》;土壤溶质运移研究主要聚焦环境科学、水资源学和农业学等学科领域,且各学科之间的知识内容具有交互性。

2) 该领域当前的研究重点主要包括基础试验研究和数值模拟优化两大部分。其中,中文文献中主要的关键词为“重金属”、“水盐运移”和“重金属迁移”;英文文献中则是“solute transport”、“transport”和“water”。

3) 生态系统中重金属或污染物的迁移转化、土壤溶质运移的尺度效应、农田灌排和耕作模式下的生

态环境效应、考虑多因素影响的土壤溶质运移和作物生长耦合模型建立、土壤改良剂的筛选和集成应用示范将是未来土壤溶质运移领域的研究重点。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 李韵珠,李保国.土壤溶质运移[M].北京:科学出版社,1998.
LI Yunzhu, LI Baoguo. Soil solute transport[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] 王虎.滴灌施肥条件下水分、养分在土壤中分布规律的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006.
WANG Hu. Study on the water and nutrient distribution pattern in soil under drip fertigation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.
- [3] 毛威.区域尺度饱和-非饱和水分及溶质运移集成模型研究与应用[D].武汉:武汉大学,2019.
MAO Wei. Research on regional-scale integrated modeling of unsaturated-saturated water flow and solute transport and its application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [4] 闫家怡.土壤溶质运移理论研究及应用[J].科技视界,2014(28):274,341.
- [5] 才芳菲.黑土区土壤养分在水分驱动下迁移参数研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
CAI Fangfei. Study on transport parameters of soil nutrients driven by water in black soil region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [6] LI Z Y, ZHANG X X, WANG D, et al. Direct methods to calculate the mass exchange between solutes inside and outside aggregates in macroscopic model for solute transport in aggregated soil[J]. Geoderma, 2018, 320: 126-135.
- [7] YAN W C, QU J B, QU Y P, et al. Effect of biochar addition on mechanism of heavy metal migration and transformation in biogas residue aerobic compost[J]. Fermentation, 2022, 8(10): 523.
- [8] 魏洪斌,罗明,向垒,等.矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析[J].环境科学,2023,44(6):3573-3584.
WEI Hongbin, LUO Ming, XIANG Lei, et al. Analysis on the distribution characteristics and influence mechanism of migration and transformation of heavy metals in mining wasteland[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3573-3584.
- [9] 冉新民,李小琴,殷丽霞.油污废水中污染物对土壤-地下水环境影响的模拟分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(2):167-175,184.
RAN Xinmin, LI Xiaoqin, YIN Lixia. Analysis and numerical simulation of the environmental impact of pollutants on groundwater[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(2): 167-175, 184.
- [10] 孙福海,肖波,李胜龙,等.黄土高原藓类生物结皮对表层土壤水分运动参数的影响[J].农业工程学报,2021,37(14):79-88.
SUN Fuhai, XIAO Bo, LI Shenglong, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on surface soil-water movement parameters in the Chinese Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 79-88.
- [11] ZHANG J H, WANG Q J, MU W Y, et al. Experimental investigation of the different polyacrylamide dosages on soil water movement under brackish water infiltration[J]. Polymers, 2022, 14(12): 2495.
- [12] 孙燕,王春宏,王全九,等.生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特征及盐基离子组成的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):228-235.
SUN Yan, WANG Chunhong, WANG Quanjiu, et al. Effects of biochemical fulvic acid application on water and salt transport characteristics and basic ion composition of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 228-235.

- [13] 张万锋, 杨树青, 胡睿琦, 等. 基于 PSWE 模型的土壤水盐运移与玉米生产效益模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 359-369.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, HU Ruiqi, et al. Simulation of soil salt-water migration and summer maize productivity based on PSWE model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 359-369.
- [14] KAVVAS M L, ERCAN A L, POLSINELLI J. Governing equations of transient soil water flow and soil water flux in multi-dimensional fractional anisotropic media and fractional time[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(3): 1 547-1 557.
- [15] 徐俊增, 刘玮璇, 卫琦, 等. 基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌土壤水分运动模拟[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 287-296.
XU Junzeng, LIU Weixuan, WEI Qi, et al. Simulation of soil moisture movement under negative pressure micro-irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 287-296.
- [16] 马蒙蒙. 层状土壤中水流和溶质运移特征及数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
MA Mengmeng. Migration characteristics and numerical simulation of water and solute in layered soil[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [17] NIELSEN D R, BIGGAR J W. Miscible displacement in soils: I. experimental information[J]. Soil Science Society of America Journal, 1961, 25(1): 1-5.
- [18] BIGGAR J W, NIELSEN D R. Miscible displacement: II. behavior of tracers[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(2): 125-128.
- [19] COATS K H, SMITH B D. Dead-end pore volume and dispersion in porous media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1964, 4(1): 73-84.
- [20] GERKE H H, VAN GENUCHTEN M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. Water Resources Research, 1993, 29(2): 305-319.
- [21] 裴青宝. 红壤土壤水分溶质运移特性及滴灌关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
PEI Qingbao. The study on soil solute transport characteristics and the key technologies of drip irrigation in red soil[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [22] 周鸿翔. 高性能孔隙尺度水流运动与溶质运移模拟方法及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
ZHOU Hongxiang. High-performance pore-scale simulation method for fluid flow and solute transport with applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [23] MOHAMMED E M, ALANI E A, ABID M M. Modeling infiltration and water distribution process of layered soils using HYDRUS-1D[J]. Indian Journal of Ecology, 2021, 48(1): 66-71.
- [24] 高震国, 钟瑞林, 杨帅, 等. Hydrus 模型在中国的最新研究与应用进展[J]. 土壤, 2022, 54(2): 219-231.
GAO Zhenguo, ZHONG Ruilin, YANG Shuai, et al. Recent progresses in research and applications of Hydrus model in China[J]. Soils, 2022, 54(2): 219-231.
- [25] KROES J G, WESSELING J G, VAN DAM J C. Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2 0 an overview of theory and an application[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(11/12): 1 993-2 002.
- [26] ZARE N, KHALEDIAN M, MAILHOL J C. Using water and agrochemicals in the soil, crop and vadose environment (WAVE) model to interpret nitrogen balance and soil water reserve under different tillage managements[J]. Journal of Water and Land Development, 2014, 22(1): 33-39.
- [27] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [28] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
- [29] 梁红妮, 胡德华. SCI 收录中国科技期刊论文的比较分析[J]. 图书情报工作, 2004, 48(10): 8-11.
LIANG Hongni, HU Dehua. A comparative study on the papers of China's science and technology journals embodied in the SCI[J]. Library and Information Service, 2004, 48(10): 8-11.
- [30] 罗杨, 吴永贵, 段志斌, 等. 基于 CiteSpace 重金属生物可给性的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 17-27.
LUO Yang, WU Yonggui, DUAN Zhibin, et al. Bibliometric analysis of bioaccessibility of heavy metals based on CiteSpace[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(1): 17-27.
- [31] 祖艳红, 张慧, 傅倩, 等. 基于 CiteSpace 的学科领域研究热点与前沿可视化分析: 以液体燃料在催化化学领域为例[J]. 复旦学报(自然科学版), 2016, 55(4): 527-533.
ZU Yanhong, ZHANG Hui, FU Qian, et al. Visualization analysis about hot research topics and fronts based on CiteSpace: Take the field of liquid fuels in catalytic chemistry as an example[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2016, 55(4): 527-533.
- [32] 张玲玲, 巩杰, 张影. 基于文献计量分析的生态系统服务研究现状及热点[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5 967-5 977.
ZHANG Lingling, GONG Jie, ZHANG Ying. A review of ecosystem services: A bibliometric analysis based on web of science[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5 967-5 977.
- [33] 闫思华, 高艳明, 王慧茹, 等. 基于 CiteSpace 的农业微咸水灌溉研究现状[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(5): 132-141.
YAN Sihua, GAO Yanming, WANG Huiru, et al. Research status of agricultural brackish water irrigation based on CiteSpace[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(5): 132-141.
- [34] 刘波, 李学斌, 陈林, 等. 基于文献计量分析的土壤固碳研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 211-220.
LIU Bo, LI Xuebin, CHEN Lin, et al. Research progress on soil carbon sequestration based on bibliometric analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 211-220.
- [35] 张金萍, 周胜利, 张奥. 膜下滴灌技术应用研究进展[J]. 黑龙江水利, 2016, 2(9): 11-15.
ZHANG Jinping, ZHOU Shengli, ZHANG Ao. The research progress of drip irrigation under mulch[J]. Heilongjiang Water Resources, 2016, 2(9): 11-15.
- [36] 康静, 黄兴法. 膜下滴灌的研究及发展[J]. 节水灌溉, 2013(9): 71-74.
KANG Jing, HUANG Xingfa. Research contents and future development of drip irrigation under plastic film[J]. Water Saving Irrigation, 2013(9): 71-74.
- [37] 张春鑫, 魏勇, 钟卫红, 等. 生物炭在农业土壤重金属污染修复中的应用研究[J]. 农业技术与装备, 2022(11): 65-67.
ZHANG Chunxin, WEI Yong, ZHONG Weihong, et al. Application of biochar in remediation of heavy metal pollution in agricultural soil[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(11): 65-67.
- [38] 张语馨, 孙涛, 马雯琪, 等. 干湿交替下生物炭添加对灰漠土 CO₂ 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 478-486.
ZHANG Yuxin, SUN Tao, MA Wenqi, et al. Addition of different types and particle sizes of biochar altered CO₂ emissions in gray desert soil under dry-wet alternation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(4): 478-486.
- [39] 刘志凯. 生物炭不同用量与施用年限对土壤水分运动及溶质运移的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
LIU Zhikai. Effects of different use level and the application's period of biochar on soil water movement and solute transport[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.

- [40] 刘腾腾, 吴超玉, 薛琳, 等. 生物炭调控土壤微生物的文献计量分析[J]. 林业与生态科学, 2023, 38(1): 88-97.
LIU Tengpeng, WU Chaoyu, XUE Lin, et al. Bibliometric analysis of biochar application effects on soil microbes[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2023, 38(1): 88-97.
- [41] 王振峰. 材料传输工程基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
WANG Zhenfeng. Fundamentals of material transmission engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [42] 石元春. 掌握水盐运动规律 综合治理旱涝碱咸[J]. 中国农业科学, 1976, 9(3): 37-41.
- [43] 贾大林, 傅正泉. 利用放射性碘¹³¹和硫³⁵研究松砂土土体和地下水盐分的运动[J]. 土壤, 1978, 10(2): 47-48.
- [44] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015—2070)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(36): 21 994-22 001.
- [45] QUINE T A, VAN OOST K. Insights into the future of soil erosion[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(38): 23 205-23 207.
- [46] 王焱森. 重金属在城市地表径流中迁移转化规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
WANG Yaosen. Study on the migration and transformation of heavy metals in urban surface runoff[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [47] 周凌峰, 孟耀斌, 逯超, 等. 流域尺度重金属行为模拟及其对不同气象因子的响应特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1 112-1 120.
ZHOU Lingfeng, MENG Yaobin, LU Chao, et al. Modeling the fate and transport of heavy metals, and their response to climate change at the watershed scale[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(5): 1 112-1 120.
- [48] 胡珂图. 鄱阳湖湿地土壤重金属形态分布特征及吸附/解吸机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
HU Ketu. Distribution characteristics of heavy metals speciation and the mechanism of adsorption/desorption in Poyang Lake wetland soil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [49] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. 矿产综合利用, 2017(6): 5-9.
HAN Zhangxiong, WAN Dejun, HU Jianping, et al. Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(6): 5-9.
- [50] ASHRAF S, ALI Q, AHMAD ZAHIR Z, et al. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 174: 714-727.
- [51] 朱立安, 殷爱华, 林兰稳, 等. 佛山城市森林公园表层土壤重金属累积特征、影响因素及其评价[J]. 生态环境学报, 2021, 30(4): 849-856.
ZHU Li'an, YIN Aihua, LIN Lanwen, et al. Accumulation characteristics, influencing factors and evaluation of heavy metals in surface soil in urban forest park of Foshan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(4): 849-856.
- [52] 滕应, 骆永明, 沈仁芳, 等. 场地土壤-地下水污染物多介质界面过程与调控研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1 333-1 340.
TENG Ying, LUO Yongming, SHEN Renfang, et al. Research progress and perspective of the multi-medium interface process and regulation principle of pollutants in site soil-groundwater[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1 333-1 340.
- [53] CHEN H Y, ZHAO G X, LIU Y Q, et al. Hyperspectral estimation models for the saline soil salinity in the Yellow River Delta[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 738/739: 197-203.
- [54] 王友年. 喀什噶尔河流域灌区土壤盐分空间变异性及影响因素分析[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(5): 43-52.
WANG Younian. Spatial variability of soil salinity and its influencing factors in irrigation area of Kashgar River Basin[J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(5): 43-52.
- [55] WANG C Y, MAO X M, HATANNO R. Modeling ponded infiltration in fine textured soils with coarse interlayer[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(3): 745-753.
- [56] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 易盐渍区粘土夹层对土壤水盐运动的影响特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 495-501.
YU Shipeng, YANG Jinsong, LIU Guangming. Effect of clay interlayers on soil water-salt movement in easily-salinized regions[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 495-501.
- [57] 丁建丽, 姚远, 王飞. 干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4 620-4 631.
DING Jianli, YAO Yuan, WANG Fei. Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4 620-4 631.
- [58] 阿斯耶姆·图尔迪, 李新国, 靳万贵, 等. 开都河流域下游绿洲土壤盐渍化影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 82-86.
ASIYEMU Tuerdi, LI Xinguo, JIN Wangui, et al. Analysis of affecting factors of oasis soil salinization in the lower reaches of kaidu river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 82-86.
- [59] 徐旭, 黄冠华, 黄权中. 农田水盐运移与作物生长模型耦合及验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 110-117.
XU Xu, HUANG Guanhua, HUANG Quanzhong. Coupled simulation of soil water flow, solute transport and crop growth processes at field scale and its validation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4): 110-117.
- [60] 孙扬越, 申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 444-459.
SUN Yangyue, SHEN Shuanghe. Research progress in application of crop growth models[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 444-459.
- [61] 赵鹏, 黄占斌, 任忠秀, 等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 618-625.
ZHAO Peng, HUANG Zhanbin, REN Zhongxiu, et al. Research and application on advance of soil conditioners of primary degraded soils in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(6): 618-625.
- [62] MUKHERJEE A, LAL R, ZIMMERMAN A R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 26-36.

Visualization of Soil Solute Transport Research: A Bibliometrics Analysis

CHEN Jihong¹, JIA Zhenjiang¹, LI Wangcheng^{1,2,3*}, WANG Jie¹, MU Min¹, NIU Xiaoxiao¹, LYU Hang¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of

Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750021, China;

3. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China)

Abstract: **【Objective】** This study aims to systematically analyze the current research and development in solute transport in soils and elucidate the research hotspots and its future development. **【Method】** The analysis is based on papers collected by the Web of Science (WoS) and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database, with the help of CiteSpace and VOSviewer visualization software. The knowledge mapping analysis of soil solute transport research topics was conducted based on the number of publications, countries of contributions, institutions of contributions, literature sources, subject distribution and keywords. **【Result】** ①Soil solute transport research has been in increase and the number of publications in English is higher than that in Chinese. Among them, China and the United States published much more than other countries. ②Among the top 10 institutions that published most, there is one from China (University of Chinese Academy of Sciences) and four from United States. There is less cooperation between Chinese scientists than their peers in other countries. ③The main English journals publishing more papers in this field are ‘Journal of Hydrology’, ‘Vadose Zone Journal’ and ‘Water Resources Research’, while the Chinese journals are ‘Journal of Irrigation and Drainage’, ‘Journal of Soil and Water Conservation’ and ‘Water Saving Irrigation’. ④Soil solute transport research is mainly in environmental science, water resources and agriculture, and the knowledge content of each discipline is interactive. ⑤The main keywords in papers published by Chinese scientists are “heavy metals”, “water-salt transport” and “heavy metal transport”, while for others the keywords are “solute transport”, “transport” and “water”. **【Conclusion】** Soil solute transport research is still a hotspot, and future research is likely to focus on transport and transformation of heavy metals and other pollutants in ecosystems, scaling up the effect of soil solute transport to large scale, ecological and environmental effects of irrigation and drainage, as well as tillage, coupled modeling of soil solute transport and crop growth considering the influence of multiple factors, and the consequence of soil conditioner applications.

Key words: soil solute transport; VOSviewer; CiteSpace; research progress; knowledge mapping

责任编辑: 赵宇龙