

基于文献计量学的植物固土研究可视化分析

经又亮¹, 惠文², 应采¹, 杨杰¹, 张珉瑞³, 段青松¹, 杨苑君¹

(1.云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201; 2.四川大学华西医院, 四川成都 610041; 3.粤水电轨道交通建设有限公司, 广东广州 510610)

摘要: [目的] 基于文献计量学探究植物固土领域的研究热点和趋势, 为该领域研究现状和发展提供参考和指导。[方法] 以中国知网(CNKI)和 Web of Science(WoS)数据库为数据来源, 利用 VOSviewer 和 CiteSpace 相结合方式对 1993—2023 年植物固土领域发文量、国家、机构、研究人员、关键词进行可视化分析。[结果] ① 发文量呈现出缓慢增长后持续性快速增长, 发文量 CNKI 近年趋于稳定而 WoS 爆发增长。② 中国是研究植物固土产出最多的国家, 但研究质量仍有提升空间, 北京林业大学、云南农业大学、内蒙古农业大学这 3 家机构是植物固土领域的主要机构, 合作发文呈现团队机构内合作紧密, 但机构外合作较为缺乏。③ 植物固土领域围绕着边坡稳定性、根系力学、根土抗剪方面开展研究, 实现词分析可知, WoS 以水土流失预测、黄土高原、机械性能, CNKI 以根系形态、消落带、力学特性、自修复以及生态修复为近 3 a 研究热点。[结论] 中国是该领域研究产出最多的国家, 但其研究质量和团队机构间的合作交流仍有提升空间, 研究植物类型多为草本植物且研究周期较短, 未来应加深对其他植物类型和周期的研究, 同时研究的生态脆弱地区目前仍旧单一, 今后仍需扩大研究区的范围。

关键词: 植物固土; 文献计量学; 可视化分析; VOSviewer; CiteSpace

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0370-11

中图分类号: S157.1, G252.7

文献参数: 经又亮, 惠文, 应采, 等. 基于文献计量学的植物固土研究可视化分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 370-380. Jing Youliang, Hui Wen, Ying Cai, et al. Visualization analysis of plant-soil reinforcement research based on bibliometrics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 370-380. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.038; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.038.

Visualization analysis of plant-soil reinforcement research based on bibliometrics

Jing Youliang¹, Hui Wen², Ying Cai¹, Yang Jie¹, Zhang Minrui³, Duan Qingsong¹, Yang Yuanjun¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming,

Yunnan 650201, China; 2. West China Hospital of Sichuan University, Chengdu, Sichuan

610041, China; 3. YSD Rail Transit Construction Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: [Objective] Based on bibliometrics, research hotspots and trends in the field of plant-soil reinforcement were explored to provide a reference and guidance for the research status and development in this field. [Methods] Using the CNKI (China National Knowledge Infrastructure) and Web of Science (WoS) databases as data sources, a combined approach using VOSviewer and CiteSpace was employed for the visual analysis of publication volumes, countries, institutions, researchers, and keywords in the field of plant-soil reinforcement from 1993 to 2023. [Results] ① The volume of publications showed a slow increase followed by a sustained rapid growth, with the publication volume in CNKI stabilizing in recent years while that in WoS surged. ② China has produced the most research results on plant-soil reinforcement, but there was still room for improvement in research quality. Beijing Forestry University, Yunnan Agricultural University, and Inner Mongolia Agricultural University were the three major institutions in the field of

收稿日期: 2024-08-15 **修回日期:** 2024-10-02 **采用日期:** 2024-10-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“金沙江流域干热河谷地区植物固土效应研究”(32060368), “滇西北高原湿地地面山的根系固土机制研究”(31700635); 第十七届学生科技创新创业行动项目(2024N092); 云南农业大学科研基金启动项目(KY2018-59); 云南省“兴滇英才支持计划项目”青年人才培养计划项目(XDYC-QNRC-2022-0225)

第一作者: 经又亮(2000—), 男(汉族), 云南省楚雄彝族自治州人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治研究。Email: 2197786566@qq.com.

通信作者: 杨苑君(1989—), 女(白族), 云南省楚雄彝族自治州人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与生态环境工程研究。Email: yangyuanjun-bj@163.com.

plant-soil reinforcement. While the collaborative publication of literature showed that the team has close cooperation within the institution it lacks cooperation outside the institution. ③ Research in the field of plant-soil reinforcement focused on slope stability, root mechanics, and root-soil shear resistance. Keyword analysis showed that WoS emphasized erosion prediction, the Loess Plateau, and mechanical properties, whereas CNKI highlighted root morphology, drawdown zones, mechanical characteristics, self-repair, and ecological restoration as research hotspots over the past three years. [Conclusion] China has the highest research output in this field; however, there is room for improvement in research quality and collaboration among teams and institutions. Most studies have focused on herbaceous plants and have had relatively short durations. Future research should deepen the study of other plant types and longer durations. In addition, research on ecologically vulnerable areas remains limited, indicating the need to expand the scope of future research.

Keywords: plant-soil reinforcement; bibliometrics; visual analysis; VOSviewer; CiteSpace

中国是水土流失最严重的国家之一,2023 年水土保持公报发布的信息显示中国水土流失面积达到了 $2.63 \times 10^6 \text{ km}^2$,虽然中国水土流失治理近年来卓有成效,但随着城市化的发展和相关生产建设项目与日俱增,中国的水土保持工作依旧面临强大压力^[1-2]。植物在防治水土流失和改善生态环境方面发挥着多重作用,植物的地上部分林木的树冠和覆盖其下的枯枝落叶层,能够对降雨进行拦截,减少雨水直接冲击土壤的力度,延缓地表径流的形成,增强土体对径流的抵抗冲刷能力,降低水土流失的风险^[3]。与地上部分相比,植物地下部分根系在稳固土壤,提高土壤抗侵蚀能力方面发挥着至关重要的作用,目前根系固土机制的研究主要集中于:一方面通过根系在土体中交错、穿插,网络串联固持土壤的根土复合体土力学效应^[4],其中根系抗拉特性、根土抗剪特性、加筋作用是力学效应研究的重点研究内容;另一方面为提高土壤抗蚀性,通过植物改善土壤的渗透性、含水率等来改善土壤自身的水力学效应,而水力学效应侧重于植物对土壤水分、土体结构、土壤理化性质等方面的研究^[5]。随着科学技术的不断发展,在微观方面植物固土也取得了一些进展,植物化学含量^[6]和植物微观结构^[7]会影响根土复合体土力学从而影响着固土能力。而从宏观角度上看,在水土流失区里营造植被,能够改良小气候,提升空气湿度、调控气温以及降低土壤蒸发,从而极大程度地改善恶劣的气候为水土保持创造有利气候条件^[8]。可以说用植物来保持水土,是最为有效的防治手段与举措,同时既环保又经济,在水土保持措施中有着不可替代的关键作用^[9]。

目前国内外在水土保持框架下的文献计量研究十分有限,主要围绕着土壤侵蚀^[10]、小流域治理^[11]、水土流失^[12]、废弃地植被恢复^[13]、消落带^[14]开展研究,而针对植物固土的文献计量研究鲜有报道^[15],随着植物固土研究的不断深入以及相关技术的持续发展,研究热点也随着政策法规的变化而不断演变,国

内外大量有关植物固土文献的激增,导致学者对植物固土领域研究的热点和掌握文献信息的能力越发困难,因此针对植物固土研究的文献计量研究十分迫切,急需在大量的文献中通过新的技术手段把握植物固土的研究热点和近年来的研究趋势。本文利用 CiteSpace 和 VOSviewer 两款软件基于中国知网期刊(CNKI)数据库与 Web of Science(WoS)数据库对近 30 a 来植物固土领域的发文量、国家、机构、研究人员、关键词聚类 and 突现进行可视化分析,以期把握植物固土领域研究热点及方向,为未来后续发展趋势做出预测和科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文中文数据来源于中国知网期刊(CNKI)数据库,英文数据来源于 Web of Science(WoS)数据库。

中国知网期刊(CNKI)数据库以高级检索“植物固土”OR“植被固土”OR“根系固土”为主题的中文检索式,筛选标准为:①发表时间为 1993 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日;②文献类型为学术期刊、学位论文;排除标准为:与文献研究内容与主题不相符或关联度不高的文献,专利、报纸、年鉴、标准中文数据库检索出文献 1 020 篇,经过人工复检共整理出有效文献 861 篇。

Web of Science(WoS)数据库则以高级检索 $TS=(\text{plant} * \text{OR} \text{vegetation} * \text{OR} \text{root} *) \text{AND} TS=(\text{"solid soil"} \text{OR} \text{reinforcement}) \text{AND} TS=(\text{soil})$ 为主题定制英文检索式进行检索,筛选标准为:①发表时间为 1993 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日;②选定语言类型设置为“English”文献类型选定“article”。排除标准为:与文献研究内容与主题不相符或关联度不高的文献。英文数据库检索出文献 861 篇,经过人工复检共整理出有效文献 779 篇。

1.2 分析方法

CiteSpace 该软件基于 Java 环境,旨在对文献进行网络分析和可视化展示,帮助研究人员更好地理解学术领域的发展动态和知识结构^[16-17]。该软件具有内置算法众多,灵活性较高,分析能力强大且准确可靠等优点,但其操作复杂设置参数众多,部分图像呈现质量较差等缺点;VOSviewer 该软件与 CiteSpace 相比具有图像呈现清晰直观,操作简单,可视化效果出色,但数据处理和挖掘能力较低。目前大多文献计量研究主要采取 VOSviewer 和 CiteSpace 两款软件相结合方式进行美化与补充^[18]。

本文将 WoS 数据库所筛选的文献以记录内容为全记录与引用参考文献的“纯文本文件”格式导出数据库,CNKI 数据库将所筛选的文献以“refworks”格式导出数据库,运用 CiteSpace(版本 6.3.R1)将 g-index 中 K 值调为 25,时间阈值设置为 1 a 的时间节点进行发文量、国家、机构、研究人员、关键词突现(WoS 数据中 γ 为 1,CNKI 数据中 γ 为 0.9)、关键词聚类分析,运用 VOSviewer(版本 1.6.20)将阈值参数设定为 5,进行国家、研究人员、关键词(阈值参数为 10)的共现分析,并通过 pajek64 进行圆圈节点位置的重新调整制作共现图,运用 Excel 2022 进行数据统计,Origin 2022 制作发文量点线图。

2 结果与分析

2.1 年发文量分析

年发文量在一定程度上可以反映出在某一时间段内植物固土研究领域研究的整体态势,并且可以直观地显示出植物固土研究领域的发展情况以及趋势。通过对 WoS 与 CNKI 数据库 1993—2023 年近 30 a 发文量统计分析可以看出(图 1),有关植物固土研究领域可分为两个阶段。第一阶段为 1993—2004 年,无论是英文数据库还是中文数据库有关植物固土的研究均呈现出发文数量低于 10 篇,表明关于植物固土的研究还处于萌芽起步阶段。第二阶段为 2004—2023 年,英文数据库和中文数据库有关植物固土的研究均呈现出逐渐上升的态势,表明植物固土的研究逐渐受到有关学者的关注。而通过中外发文数据对比可分为 3 个阶段,即同步发展阶段、领先阶段、被追赶阶段。①同步发展阶段(1993—2005 年)。这一时期,植物固土研究还处在萌芽时期中英文的文献数据均相差不大。②领先阶段(2006—2015 年)。这一时期,年平均发文量中文高于外文发文 13 篇,中文发文量领先外文。③被追赶阶段(2016—2023 年)。这一时期中文发文量和外文发文量不差上下,但从 2020

年起外文开始领先中文,中文发文量趋于平稳,这并不意味着国人在植物固土领域研究出现停滞,而是近些年来随着国民教育素质不断提高,在外文数据库中有相当大一部分发文为国人,随着全球化的发展,国人近年更偏向于将研究成果发表在外文文献中,从而提高研究成果的国际影响力。

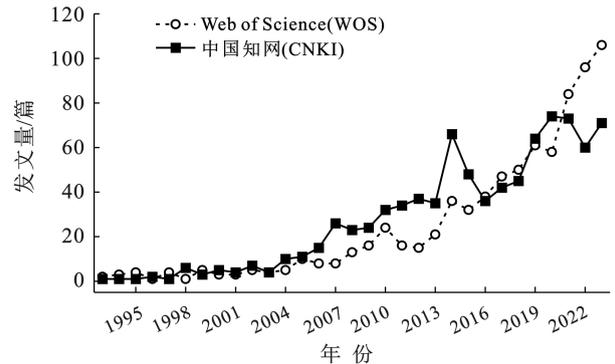


图 1 WoS 与 CNKI 数据库 1993—2023 年度发文量
Fig.1 Annual publication volume of WoS and CNKI database during 1993—2023

2.2 植物固土研究力量分析

2.2.1 植物固土国家分析 通过对发文国家分析可以了解全球针对植物固土研究领域的发文,合作共现情况,利用 CiteSpace 对英文文献排名前 10 的国家发文量和中介中心性进行分析(表 1),VOSviewer 进行发文量大于 5 篇以上的国家视为核心国家,进行核心国家合作共现分析(图 2);从表 1 可以看出,1993—2023 年近 30 a 内,中国的发文量共发文 299 篇,是发文排名第二美国发文量的 2.57 倍,美国、意大利、苏格兰、法国、英格兰发文量均超过 30 篇。中介中心性的大小可以反映出国家针对植物固土研究领域的影响力强弱,从中介中心性上看,中国发文量虽远超美国,但影响力美国排名第一,中国排名第二。针对植物固土研究领域,美国、中国、法国、日本、意大利在研究领域上具有较高影响力。

表 1 WoS 数据库发文量前 10 位的国家

Table 1 Top 10 countries of publication volume in WoS database

国家	发文量/篇	中介中心性
中国(China)	299	0.24
美国(USA)	116	0.49
意大利(Italy)	70	0.12
苏格兰(Scotland)	65	0.09
法国(France)	49	0.24
英格兰(England)	34	0.07
伊朗(Iran)	28	0.01
印度(India)	27	0.07
澳大利亚(Australia)	31	0.04
日本(Japan)	22	0.16

图 2 国家共现合作图中,圆圈大小代表发文数量的多少,连接线数量代表合作国家的数量,连接线粗细代表合作的紧密程度,可以看出全球针对植物固土领域国家合作发文量大于 5 篇的集中在东亚、北美、欧洲地区。其中,中国、美国、法国、苏格兰、瑞士、英格兰与其他国家合作发文较为密切,非洲地区在该领域研究有待加强。

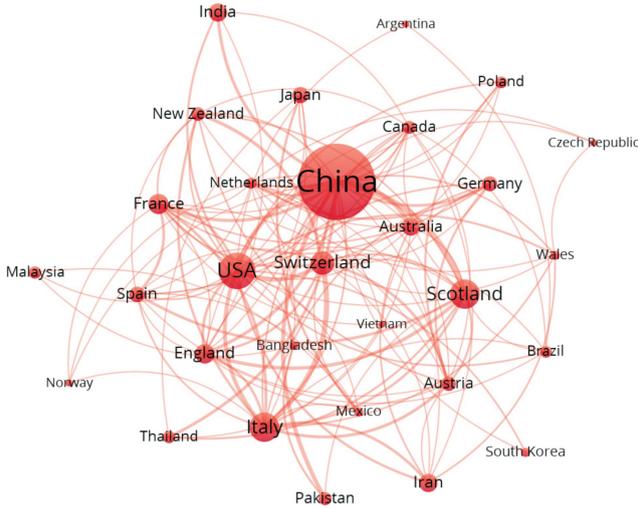


图 2 WoS 数据库发文量大于 5 的国家合作共现图

Fig.2 Co-currence chart of cooperation countries with publication volum greater than 5 countries in WoS database

2.2.2 植物固土机构分析 通过对发文机构分析可以了解针对植物固土研究领域的情况,利用 CiteSpace 对 WoS 数据库和 CNKI 数据库进行机构发文统计(表 2)。从 WoS 数据库和 CNKI 数据库发文量前 10 位机构可以看出,国际机构中排名前 10 的机构里中国占有 5 位名额,表明目前国际机构研究植物固土的以中国机构为主,中国为植物固土领域的研究发展做出突出的贡献。而在 CNKI 数据库中可以看出,发文量北京林业大学排名第一,共 121 篇,占 CNKI 数据库发文总量的 14.05%,处于国内领跑地位;在国内发文前 3 分别为北京林业大学、云南农业大学、内蒙古农业大学三所机构,发文比例均超过 7%,且 3 家机构发文总比例占 CNKI 数据库比例的 30.3%,表明 3 家机构是目前国内研究植物固土的主要研究机构。其中,北京林业大学的研究面向全国,但近年来主要集中关注华北^[7]、重庆缙云山^[19],黄土高原地区^[20]。云南农业大学的研究主要针对三江并流区消落带的土壤稳定性^[21]、岩溶地带石漠化土壤侵蚀^[22]、干热河谷地区^[5],其研究范围包含云南全境但对省外研究并未有太多涉足;内蒙古农业大学主要针对沙漠化固沙固土^[23]、内蒙古干旱半干旱地区^[24]来研究。各研究机构根据所关注地区的水土流失问题各有研究侧重点。

表 2 WoS 和 CNKI 数据库发文量前 10 位机构

Table 2 Top 10 institutions of publication volume in WoS and CNKI database

WoS 数据库			CNKI 数据库		
国际机构	发文量/篇	发文比例/%	国内机构	发文量/篇	发文比例/%
中国科学院(中国科学院大学)	75	9.62	北京林业大学	121	14.05
邓迪大学	38	4.87	云南农业大学	79	9.17
法国农业食物与环境研究所	37	4.74	内蒙古农业大学	61	7.08
法国国家科学研究中心	34	4.36	中国科学院	46	5.34
香港科技大学	33	4.23	中南林业科技大学	44	5.11
瑞士联邦理工学院	28	3.59	南京林业大学	30	8.47
北京林业大学	28	3.59	东北林业大学	29	3.33
詹姆斯赫顿研究所	25	3.20	西南大学	26	3.01
中国山地灾害与环境研究所	19	2.43	三峡大学	15	1.74
太原理工大学	13	1.16	西北农林科技大学	15	1.74

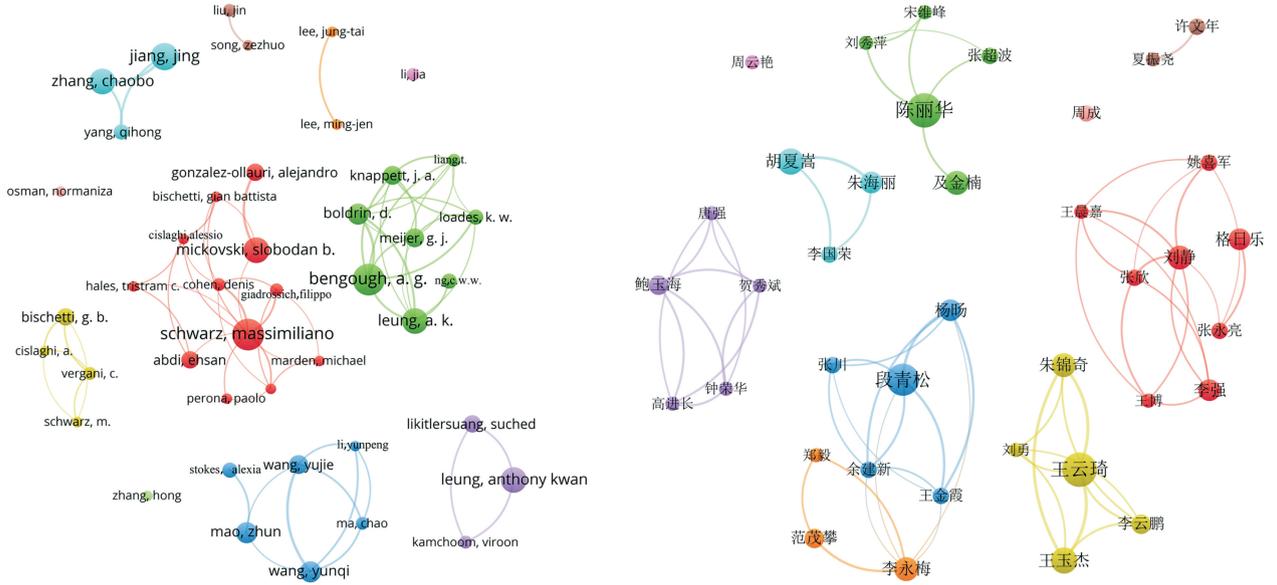
2.2.3 植物固土研究人员分析 通过对发文作者分析可以了解针对植物固土研究领域研究人员情况,利用 VOSviewer 将发文量大于 5 篇以上的作者视为核心作者,并将其进行合作共现分析(图 3),借助作者合作共现图谱可以更清晰地观察到核心作者的合作关系与其他团队的合作情况。图谱中的圆圈代表不同作者,圆圈大小代表核心作者的发文情况、发文次数越多圆圈越大,圆圈之间的连线及其颜色则揭示了核心作者之间的合作关系及其紧密程度,连线越粗则

代表发文作者合作越密切。

在 WoS 数据库中合作密切的团队有 Schwarz 团队、Benggough 团队、Bischetti 团队、Wang Yunqi 团队,CNKI 数据库中合作密切的团队机构有段青松团队、王云琦团队、贺秀斌团队、刘静团队。WoS 数据库中发文量最高的是英国邓迪大学 Benggough 团队,主要聚焦于木本树种水力机械加固土壤^[25]、根土模型预测(DRAM)^[26]、根类似物固土^[27]、根土入渗^[28]。发文量排名第一的机构中国科学院则聚焦于

黄土高原水土保持^[29]、边坡稳定性^[30]、林种种间固土^[31]。CNKI 发文排名第一团队是云南农业大学段青松团队,其主要聚焦于三江并流区消落带^[32-33]、根土抗剪^[34]、根系力学^[4]。排名第一机构北京林业大学则聚焦于地区植物固土机制差异^[35]、森林火灾植被恢复固土^[19]、根系固土模型^[36]、根系化学含量固土

效能影响^[6,37-38]。由此可以看出每个研究团队和机构针对植物固土的研究方向均有不同,但从图 3 可以看出两个数据库中呈现出团队机构内小聚集研究合作紧密,却并未出现团队机构外大聚集的研究,表明在植物固土的研究领域,需要进一步开展机构与机构之间的合作对话交流。



注: WoS 数据库中 Wang Yunqi 团队与 CNKI 数据库中王云琦团队为同一机构团队。

图 3 WoS 和 CNKI 数据库发文量大于 5 作者合作的共现图

Fig.3 Cooperation co-occurrence chart of authors published more than 5 papers in WoS and CNKI database

2.3 植物固土关键词分析

2.3.1 植物固土关键词聚类共现分析 关键词凝练了一篇文献的精髓和核心,可以反映该文献的重点研究内容与方法。通过对关键词的共现分析可以迅速了解植物根系固土领域研究的热点和关联性,帮助研究者更直观的了解植物固土领域的研究方向,利用 VOSviewer 将 WoS 数据库中 3 943 个, CNKI 数据库中 1 489 个关键词,选择词频大于 10 次以上剔除检索词视为核心关键词(WoS 核心关键词 117 个, CNKI 核心关键词 48 个),并将其进行关键词聚类共现分析(图 4),图中圆圈大小代表关键词出现的次数,圆圈越大代表关键词次数越多,越能代表植物固土领域的热点,圆圈连线代表关键词间的关联强度,连线越多说明在同一文献共同出现的次数越多。从图中可以看出, WoS 数据库中关键词出现高频关键词有 slope stability(158 次)、root reinforcement(149 次)、soil reinforcement(86 次)、root tensile strength(79 次);而在 CNKI 数据库中则以抗剪强度(102 次)、根土复合体(89 次)、抗拉强度(51 次)。对比两个数据库高频关键词发现,目前在植物固土领域均集中在根系固土力学和边坡稳定方面来开展研究。

聚类分析则可以对其关键词进行归纳概括,利用 CiteSpace 和 VOSviewer 分别聚类分析,在 CiteSpace 中 WoS 数据库中平均轮廓值 $S=0.7838$, 文献聚类图谱块值 $Q=0.6035$, 在 CNKI 数据库中 $S=0.8431$, $Q=0.6022$, 在 CiteSpace 聚类中当 Q 值 >0.3 时表示关键词划分出的结构是显著的, S 值 >0.7 时则说明聚类分析主题明确、高效且令人信服^[13]。由于 VOSviewer 与 CiteSpace 关键词分析类似,经过两款软件聚类对比也接近相同,但 VOSviewer 更能直观展现出聚类后的图像(图 4),图中圆圈颜色代表不同的聚类及研究主题。可以看出在 WoS 数据库中有关植物固土领域围绕着: ① slope stability; ② vegetation soil and water conservation; ③ root-soil shear strength; ④ root reinforcement 这 4 个主题开展研究,在 CNKI 数据库中有关植物固土领域围绕着: ① 边坡稳定性; ② 根系力学; ③ 根土抗剪; ④ 消落带水土保持; ⑤ 生态修复这 5 个主题开展研究。

通过关键词聚类(图 4)分析可知聚类 1[#] 边坡稳定性、聚类 2[#] 根系力学、聚类 3[#] 根土抗剪, 3 个聚类是植物固土领域 WoS 和 CNKI 数据库文献研究的共同热点。聚类 2[#] 根系力学是评价植物固土效应的重

要指标之一,其聚类的主要高频关键词为根系(植物根系)、抗拉特性、抗拉力学、抗拉力、弹性模量等。不同植物其根系力学特性存在差异^[4],目前的研究热点集中在植物根系力学特性的影响因素上,影响其力学特性的原因可分为植物生长时期养分获取、遗传、组成成分、化学含量、微观结构差异等内在因素^[4,37-40],拉伸速率、标距、夹具与根系之间是否增加摩擦力、季节变化等外在因素^[38,41-42]。其中根径是影响根系力学性能的主要因素,但目前根径分级国内外并未形成统一标准^[32]。此外,由于受到根系挖掘难度和试验设备条件的限制,目前针对 10 mm 以上超大粗根乔木根径的研究十分有限,主要以 5 mm 以下根径的草本和灌木力学特性研究为主。聚类 3[#] 根土抗剪亦是评价植物固土效应的指标之一,其聚类的主要高频关键词为抗剪强度、根土复合、边坡等。目前,利用植物根系固土的抗剪评价方法主要有原位剪切试验、快速直剪试验和三轴试验^[43]。影响根土抗剪特性的因素有植物因素和土壤因素两大类,植物因素有植物类型、根系形态分布、根系倾角度、根系力学等,可见聚

类 2[#] 根系力学也是聚类 3[#] 根土抗剪的关键研究方向;而土壤因素包括土壤含水率、土壤质地、土层深度、土壤化学成分含量等理化性质^[34,44-45]。但目前受限于试验条件的限制,大多剪切试验样本多为室内重塑土,而原状土和重塑土的剪切试验具有差异^[46],且剪切盒体积多数在 100 cm³ 左右,虽然近年来也有学者进行了大型剪切试验^[47],但对于多年生乔木和灌木的根土大型剪切研究依旧十分匮乏,今后仍需加强研究。聚类 1[#] 边坡稳定性是水土保持研究的重点话题,其聚类的主要高频关键词为边坡稳定、数值模拟、有限元法、黄土高原、滑坡等,针对边坡稳定性植物固土的研究。由于边坡较为宏观,目前主流的研究方法是以上述两个聚类(根系力学和根土抗剪)为基础,再通过数值模拟模型的构建来开展研究。植物固土数值模拟的方法有离散单元法、有限单元法、有限差分法、边界单元法等^[48],相关方法各有优劣,但普遍存在模拟精度不高,模拟关键因素考虑不全(如模拟根土边坡植物较为单一、缺乏水文效应、根系生长变化不能随根土边坡动态模拟等)^[49]。

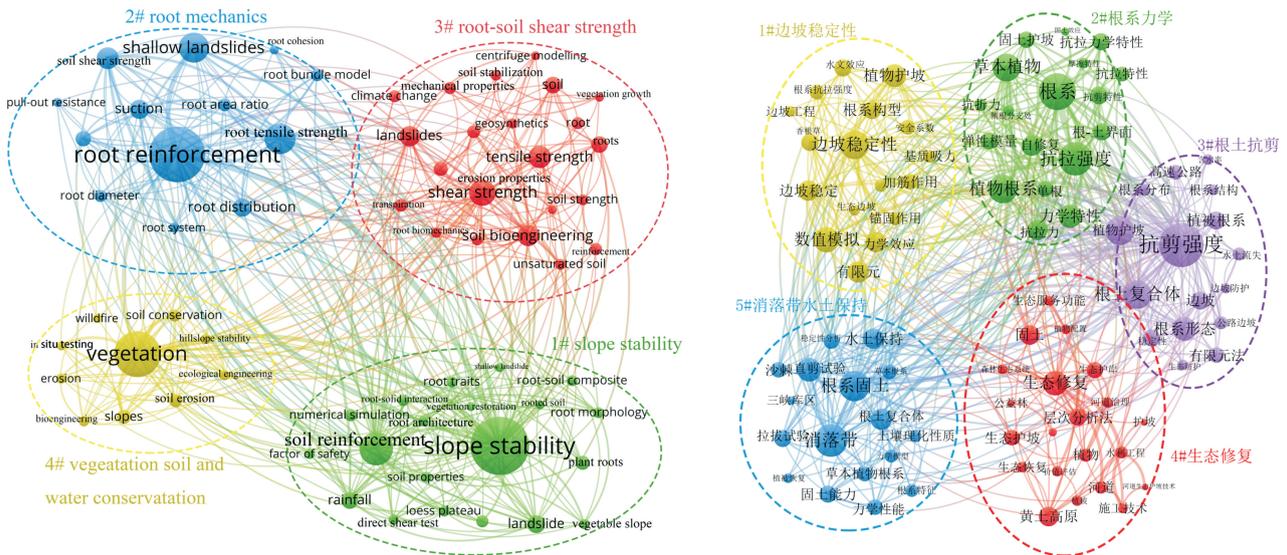


图 4 WoS 和 CNKI 数据库关键词聚类共现图

Fig.4 Co-occurrence chart of keyword cluster in WoS and CNKI database

WoS 数据库聚类 4[#] 为植被水土保持,其土壤侵蚀等高频关键词主要围绕黄土高原展开研究,研究重点是植被对土壤稳定性的影响,如 Yu^[50] 等通过黄土高原植被恢复的研究认为冠层可以拦截降雨保护土壤结构完整,枯落物可以减低溅蚀量、改善土壤理化性质、提高土壤抗蚀性^[51],而根系则通过力学和其分泌物增强土壤颗粒结合,提高土壤稳定性^[52]。然而,植物在水土保持中不一定发挥正面作用,Jiang^[53] 等认为植物在生长过程中由于所需水分,会利用其自身

蒸腾作用降低其原有土壤含水量从而导致土地退化。植被水土保持不只是植物固土研究领域的关键内容,更是水土保持研究大领域的研究重点,目前研究成果已较为成熟。

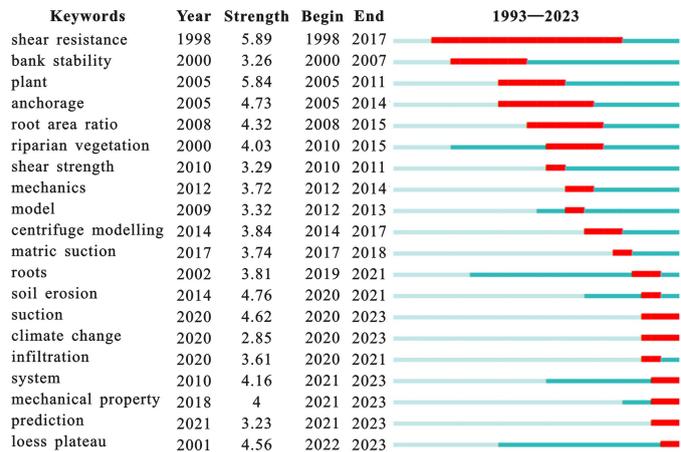
在 CNKI 数据库中聚类 5[#] 为消落带水土保持,其主要高频关键词为根系固土、消落带、拉拔试验、水土保持等。消落带作为水陆交替循环的缓冲带,由于季节性水位涨落,导致其原生植物消亡,加剧了消落带的水土流失、边坡崩塌,近年来一直被许多学者

关注^[32-33,54-55]。陈忠礼^[14]通过文献计量的研究认为未来消落带植物的研究可以围绕在植物的分子水平,不断提高消落带植物研究的宽度和深度。在消落带植物固土力学方面,罗鹏彪^[56]在通过模拟消落带水下单根拉拔时观察到水膜现象,水膜的产生会导致根系与土体的静摩擦力的降低,导致水下拉拔均拉拔成功无拉断,为消落带水下固土提供了新思路。目前针对消落带的研究国内主要集中在三峡地区,针对其他地区如金沙江干热河谷、二滩水库消落带、丹江口水库等其他地区虽有关关注,但是依旧缺乏,三峡消落带的水土保持植被恢复治理,生态系统的动态发展规律能否运用到其他地区依然需要学者长期的研究以及论证^[21,57]。

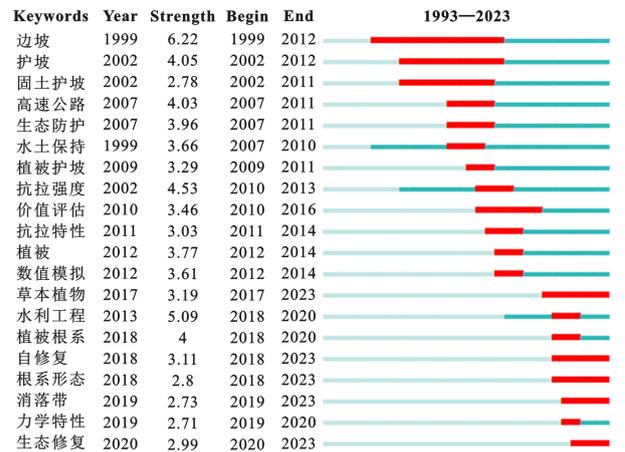
2.3.2 植物固土关键词突现分析 关键词突现是指某些关键词在一定时间范围内使用频次大幅增加,超出正常的波动。通过关键词的突现分析可以快速识别植物固土领域特定时期的研究焦点和热门话题,从而推断出植物固土领域的研究进展趋势和研究前沿。利用 CiteSpace 软件筛选 WoS 和 CNKI 数据库中关键词前 20 的突现词进行分析(图 5)。从图 5 可以看出,英文关键词强度和中文关键词强度不相上下,且大多在 3 以上,表明在植物固土领域两个数据库的关键词均有很高影响力。从强度爆发周期上看, WoS 数据库的关键词:剪切强度、边坡稳定、植物、锚固、根表面积比、河岸植被; CNKI 数据库的关键词:边坡稳

定性(边坡、护坡、固土护坡)、价值评估、草本植物、自修复、根系形态,其爆发均超过 5 a,说明在植物固土领域,以上关键词一直是众多学者研究的热点。从强度上看, WoS 数据库中剪切力、植物、锚固、土壤侵蚀、吸力、黄土高原强度均超 4.5,而 CNKI 数据库边坡、抗拉强度、水利工程强度均超 4.5,说明这些关键词在近 30 a 植物固土领域有着较高的影响力,是植物固土研究的主要话题。关键词突现往往随着相关政策完善和法规的建立而进行演变,如在 2022 年国家出台《中华人民共和国黄河保护法》,其中第三章明确提出生态保护修复目标^[58],而以黄河粗泥沙集中来源区的黄土高原被列为 2024 年全国水利工作会议的工作重点^[59],这也是近 3 a 来国内外研究学者集中的关注点原因之一,从而导致本文 WoS 数据库中的黄土高原关键词在 2022 年出现爆发。1993—1997 年由于植物固土的研究还处于萌芽阶段,因此并未出现关键词的突现现象。1998—2017 年对于植物固土的研究受限于研究技术的局限,研究侧重于对其根土复合体、植物个体的探讨。2017—2023 年随着植物固土机制的基本成熟,人工智能、地理信息系统和遥感等相关算法的不断完善其测量的精确性不断提高,近年在植物固土领域关注点更为宏观如:山水林田湖草沙系统(系统)、水土流失预测(预测)、机械性能、生态修复,此外研究的侧重点也开始着重关注水土保持脆弱带,如黄土高原、水库消落带。

a WoS数据库



b CNKI数据库



注:灰色代表该关键词该时间段尚未出现;青色代表该时间段已有所研究;红色代表该关键词出现爆发式研究;“Strength”代表突现强度。数值越大表明该关键词在植物固土研究领域的研究影响力越大。“Begin”和“End”分别代表关键词爆发的开始和结束年份。

图 5 WoS 和 CNKI 数据库关键词突现分析

Fig.5 Analysis on keyword burst in WoS and CNKI database

3 结论与展望

(1) 从发文量上分析,两个数据库总体发文量

2004 年前处于研究的萌芽阶段后持续增长, CNKI 有近 10 a 发文量明显多于 WoS,但近年国人更偏向于外文期刊导致 CNKI 发文趋于稳定而 WoS 却爆发增

长,国人需要增强对国内期刊的认同感。

(2) 从研究力量上分析,中国是植物固土研究产出最多的国家,但其研究质量(中介中心性)远低于美国,仍有较大的提升空间。发文量前十的研究机构中,WoS 中半数研究机构为中国机构,CNKI 中北京林业大学、云南农业大学、内蒙古农业大学三家机构是植物固土研究的主要机构。从作者合作发文上看,每个研究团队研究侧重点均有不同,但呈现出团队机构内合作紧密,且机构外团队之间的合作交流较为缺乏,今后需要加强植物固土合作团队和机构间的交流,提高研究成果的可推广性。

(3) 从关键词上分析,植物固土领域 WoS 和 CNKI 数据库均围绕着:边坡稳定性、根系力学、根土抗剪来开展研究,目前大多研究集中在草本植物的研究,对于乔木以及灌木的研究今后仍需加强。此外植物生长是一个长期的动态过程,但多数为短期试验,应增加更全面的植物固土环境影响因素,以及扩大研究的周期范围,提高试验或固土模型的精确性。近年来国内三峡消落带、黄土高原生态脆弱带开始成为植物固土关注焦点,但其他生态脆弱带地区的研究较为不足,未来应该扩大其生态脆弱的研究范围,如从根系形态和根际效应出发进行固土植物的筛选和配置,在植物固土机理的研究中引入土壤水文效应、土壤微生物和根系生长变化的动态影响等因素。

参考文献 (References)

[1] 《中国水土保持公报(2023 年)》综述[J].中国水土保持,2024(7):41.
Summary of China soil and water conservation bulletin (2023) [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024 (7):41.

[2] 胡甲均.以确保“一泓清水永续北上”引领南水北调中线水源区水土保持高质量发展[J].水利发展研究,2024,24(2):33-38.
Hu Jiajun. Leading the high-quality development of soil and water conservation in the water source area of the middle route of the South to North Water Diversion Project through ensuring the “clear waters keep flowing northward” [J]. Water Resources Development Research, 2024,24(2):33-38.

[3] 刘京晶,马岚,薛孟君,等.不同处理下油松枯落物减流减沙效应试验研究[J].水土保持学报,2019,33(4):126-132.
Liu Jingjing, Ma Lan, Xue Mengjun, et al. Effect of runoff and sediment reduction of different treatment by litter of *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(4):126-132.

[4] 经又亮,杨苑君,王忠良,等.3 种耐旱耐瘠护坡植物根系

形态及抗拉特性[J].水土保持研究,2024,31(4):163-169.
Jing Youliang, Yang Yuanjun, Wang Zhongliang, et al. Root morphology and tensile characteristics of three kinds of drought-tolerant plants for slope protection [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 163-169.

[5] 张珉瑞,王立娜,李盼,等.金沙江干热河谷区 5 种植被土壤入渗性能影响因素评价[J].水土保持研究,2024,31(6):37-45.
Zhang Mingrui, Wang Lina, Li Pan, et al. Influencing factors of soil infiltration performance of five vegetations in dry-hot valley area of Jinsha River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):37-45.

[6] 吕春娟,陈丽华,周硕,等.油松根系固土的基本力学特性[J].水土保持学报,2011,25(5):17-20.
Lv Chunjuan, Chen Lihua, Zhou Shuo, et al. Root basic mechanical properties of soil reinforcement of *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(5):17-20.

[7] 蒋坤云,陈丽华,杨苑君,等.华北油松、落叶松根系抗拉强度与其微观结构的相关性研究[J].水土保持学报,2013,27(2):8-12.
Jiang Kunyun, Chen Lihua, Yang Yuanjun, et al. Relationship between tensile strength and selected anatomical features of two different conifer species' roots in North China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(2):8-12.

[8] 张光灿,胡海波,王树森.水土保持植物[M].北京:中国林业出版社,2011.
Zhang Guancan, Hu Haibo, Wang Shusen. Soil and Water Conservation Plant [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.

[9] 吴宏伟,周超,张帅,等.状态相关非饱和土力学理论及应用[J].中国科学(技术科学),2023,53(10):1728-1746.
Wu Hongwei, Zhou Chao, Zhang Shuai, et al. State-dependent theory for unsaturated soil and its applications [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023,53(10):1728-1746.

[10] 王洪雨,于寒青.基于文献计量分析的土壤侵蚀与土壤有机碳动态研究进展与展望[J].土壤通报,2023,54(6):1470-1483.
Wang Hongyu, Yu Hanqing. Research prospect and progress of soil erosion and soil organic carbon dynamics based on bibliometric analysis [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(6):1470-1483.

[11] 郑晓岚,宋娇,程华,等.基于中文文献计量分析的生态清洁小流域研究现状及趋势[J].江苏农业学报,2021,37(3):676-685.
Zheng Xiaolan, Song Jiao, Cheng Hua, et al. Research status and trends of small eco-clean watershed based on

- Chinese bibliometric analysis [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(3): 676-685.
- [12] 张晶, 李娜. 文献计量视域下黄河流域水土流失研究进展分析[J]. *科学观察*, 2024, 19(1): 39-53.
Zhang Jing, Li Na. Analysis of research progress of soil and water loss in the Yellow River basin from the perspective of bibliometrics [J]. *Science Focus*, 2024, 19(1): 39-53.
- [13] 宋智衍, 王建文, 陈平平, 等. 生产建设项目废弃地植被恢复研究热点与趋势[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 430-438.
Song Zhiyan, Wang Jianwen, Chen Pingping, et al. Research hotspots and trends of vegetation restoration in waste sites of production and construction projects [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 430-438.
- [14] 陈忠礼, 冯源, 朱姿涵, 等. 水库消落带植物生态学研究热点: 以三峡水库为例[J]. *草业科学*, 2024, 41(8): 1909-1923.
Chen Zhongli, Feng Yuan, Zhu Zihan, et al. Research hotspots in plant ecology of reservoir drawdown zone: taking the Three Gorges reservoir as an example [J]. *Grassland science*, 2024, 41(8): 1909-1923.
- [15] 温希望, 宋艳曦, 蔡崇法, 等. 植物生物力学特性在水土保持领域的研究进展与热点[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(4): 338-346.
Wen Xiwang, Song Y, Cai Chongfa, et al. Research progress and hotspots of biomechanical properties of plants in relation to soil and water conservation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 338-346.
- [16] Chen Chaomei, Hu Zhigang, Liu Shengbo, et al. Emerging trends in regenerative medicine: A scientometric analysis in CiteSpace [J]. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 2012, 12(5): 593-608.
- [17] Chen Chaomei, Song I Y, Yuan Xiaojun, et al. The thematic and citation landscape of "Data and Knowledge Engineering" (1985—2007) [J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2008, 67(2): 234-259.
- [18] 曲孝云, 侯东杰, 陆帅志, 等. 基于文献计量分析的青藏高原草地研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(19): 8229-8240.
Qu Xiaoyun, Hou Dongjie, Lu Shuaizhi, et al. Study on grassland in Qinghai-Tibet Plateau based on bibliometric analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(19): 8229-8240.
- [19] 李通, 王云琦, 祁子寒, 等. 重庆缙云山森林火灾干扰边坡的滑坡易发期预测[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 131-141.
Li Tong, Wang Yunqi, Qi Zihan, et al. Prediction of landslide prone period for forest fire disturbed slope in Jinyun Mountain, Chongqing of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(9): 131-141.
- [20] 黄建坤, 王学林, 及金楠, 等. 基于渐近均匀化理论的黄土高原草本植物固土效果模拟[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 168-176.
Huang Jiankun, Wang Xuelin, Ji Jinnan, et al. Numerical simulation of root reinforcement for herbs in Loess Plateau based on asymptotic homogenization theory [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 168-176.
- [21] 段继琪, 李建兴, 王波, 等. 4 种消落带适生草本根系抗拉特性及与微观结构的关系[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 130-138.
Duan Jiqi, Li Jianxing, Wang Bo, et al. Relationship between tensile properties and microstructures of four kinds of herbaceous root in the water-level-fluctuating zone [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 130-138.
- [22] 陈晨, 杨苑君, 陈奇伯, 等. 典型石漠化区土壤理化性质对其抗剪性能的影响[J]. *西部林业科学*, 2020, 49(2): 91-98.
Chen Chen, Yang Yuanjun, Chen Qibo, et al. Effect of soil physico-chemical properties on shear resistance in typical rocky desert areas [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, 49(2): 91-98.
- [23] 任廷婕, 袁立敏, 高永, 等. 3 种植物基固沙剂固土性能及其对植物生长影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 145-151.
Ren Tingjie, Yuan Limin, Gao Yong, et al. Experimental study on soil fixation performance of three plant-based sand fixing agents and their effects on plant growth [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 145-151.
- [24] 崔天民, 格日乐, 毅勃勃, 等. 沙棘根系固土力学特性对其平茬复壮的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2024, 43(1): 108-114.
Cui Tianmin, Ge Rile, Yi Bole, et al. Response of soil consolidation mechanical properties of *Hippophae rhamnoides* roots to rejuvenation of mowing [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(1): 108-114.
- [25] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Hydro-mechanical reinforcement of contrasting woody species: A full-scale investigation of a field slope [J]. *Géotechnique*, 2021, 71(11): 970-984.
- [26] Meijer G J, Knappett J A, Bengough A G, et al. DRAM: A three-dimensional analytical model for the

- mobilisation of root reinforcement in direct shear conditions [J]. *Ecological Engineering*, 2022,179:106621.
- [27] Meijer G J, Bengough A G, Knappett J A, et al. New *in situ* techniques for measuring the properties of root-reinforced soil-laboratory evaluation [J]. *Géotechnique*, 2016,66(1):27-40.
- [28] Leung A K, Boldrin D, Liang T, et al. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment [J]. *Géotechnique*, 2018,68(7):646-652.
- [29] Guo Wenzhao, Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2020,350:106879.
- [30] Liu Wei, Yang Zongji, He Siming. Modeling the landslide-generated debris flow from formation to propagation and Run-out by considering the effect of vegetation [J]. *Landslides*, 2021,18(1):43-58.
- [31] Mao Zhun, Roumet C, Rossi L M W, et al. Intra-and inter-specific variation in root mechanical traits for twelve herbaceous plants and their link with the root economics space [J]. *Oikos*, 2023,2023(1):755048.
- [32] 黄广杰,段青松,李建兴,等.三江并流区水库消落带 5 种草本根系形态及抗拉特性[J].*水土保持研究*,2022,29(3):389-395.
Huang Guangjie, Duan Qingsong, Li Jianxing, et al. Root morphology and tensile characteristics of five kinds of herbs in reservoir fluctuating zone of three parallel rivers [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(3):389-395.
- [33] 熊寿德,段青松,方雪峰,等.三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力[J].*生态学报*,2022,42(17):7210-7221.
Xiong Shoude, Duan Qingsong, Fang Xuefeng, et al. Soil-fixing capacity of suitable herbaceous plant roots in the water-level-fluctuating zone of hydropower station in the three parallel rivers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(17):7210-7221.
- [34] 张珉瑞,朱少东,李盼,等.干热河谷区典型植被土壤抗剪性能影响因素评价[J].*水土保持研究*,2024,31(4):153-162.
Zhang Minrui, Zhu Shaodong, Li Pan, et al. Evaluation of influencing factors of soil shear performance of typical vegetation in dry-hot valley area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(4):153-162.
- [35] 王丹,马超,王云琦,等.中国南北方植物对土壤加固机制的差异性[J].*农业工程学报*,2024,40(8):98-106.
Wang Dan, Ma Chao, Wang Yunqi, et al. Differential mechanisms of soil reinforcement by plants in Northern and Southern China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024,40(8):98-106.
- [36] 瞿文斌,及金楠,陈丽华,等.黄土高原植物根系增强土体抗剪强度的模型与试验研究[J].*北京林业大学学报*,2017,39(12):79-87.
Qu Wenbin, Ji Jinnan, Chen Lihua, et al. Research on model and test of reinforcing shear strength by vegetation roots in the Loess Plateau of Northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017,39(12):79-87.
- [37] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等.根系主要成分含量对根系固土效能的影响[J].*水土保持通报*,2014,34(3):166-170.
Zhu Jinqi, Wang Yunqi, Wang Yujie, et al. Effect of root main component content on its soil-binding capacity [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(3):166-170.
- [38] 杨苑君.华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究[D].北京:北京林业大学,2016.
Yang, Yuanjun. Study on root tensile resistance and soil shear resistance of typical trees in North China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016
- [39] 陈文乐,杜鹃,方迎潮,等.泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应[J].*水土保持通报*,2019,39(5):32-39.
Chen Wenle, Du Juan, Fang Yingchao, et al. Soil reinforcement effect of root systems of typical plants in areas with frequent debris flow [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(5):32-39.
- [40] 孙庆敏,葛永刚,陈攀,等.汶川典型植物根—土复合体抗剪强度影响因素评价[J].*水土保持学报*,2022,36(1):58-65.
Sun Qingmin, Ge Yonggang, Chen Pan, et al. Evaluation of factors affecting the shear strength of root-soil composite of typical plants in Wenchuan County [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(1):58-65.
- [41] 李宁,陈丽华,杨苑君.油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J].*北京林业大学学报*,2015,37(12):77-84.
Li Ning, Chen Lihua, Yang Yuanjun. Factors influencing root tensile properties of *Pinus tabulaeformis* and *Larix principis-rupprechtii* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015,37(12):77-84.
- [42] Cofie P, Koolen A J, Perdok U D. Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2000,57(1/2):1-12.
- [43] 何雨婷,陈鹤鸣.植物根土复合体抗剪强度及影响边坡稳定性研究现状分析[J].*广东交通职业技术学院学报*,2024,23(1):14-17.
He Yuting, Chen Heming. Analysis of current situation of research on shear strength of plant root soil

- composite and the influence on slope stability [J]. *Journal of Guangdong Communication Polytechnic*, 2024, 23(1):14-17.
- [44] 谢祥荣, 陈正发, 朱贞彦, 等. 根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2):13-28, 196.
- Xie Xiangrong, Chen Zhengfa, Zhu Zhenyan, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):13-28, 196.
- [45] Leung F T Y, Yan W M, Hau B C H, et al. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability [J]. *Catena*, 2015, 125:102-110.
- [46] 徐宗恒, 张宇, 陶真鹏, 等. 昭通烂泥箐滑坡源区原生状态根—土复合体抗剪特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4):128-134.
- Xu Zongheng, Zhang Yu, Tao Zhenpeng, et al. Mechanical characteristics of undisturbed roots-soil composites from the source area of lanniqing landslide, Zhaotong [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):128-134.
- [47] 陈婧逸, 陈晓清, 宋东日, 等. 灌木根系形态对土体强度影响的大型直剪试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(8):120-127.
- Chen Jingyi, Chen Xiaoqing, Song Dongri, et al. Effect of shrub root morphology on root-soil complex strength: A study based on large-scale direct shear test [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(8):120-127.
- [48] 胥子凡. 植物根系固土机理及边坡稳定性分析[D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- Sui Zifan. Analysis of soil reinforcement mechanism and slope stability of plant root system [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry and Technology, 2021.
- [49] 陈飞, 谢蕴忠, 王俊峰, 等. 基于数值模拟方法的根系护坡研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(16):6728-6738.
- Chen Fei, Xie Yunzhong, Wang Junfeng, et al. Research progress of root slope protection based on numerical simulation method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(16):6728-6738.
- [50] Yu Yang, Zhao Wenwu, Martinez-Murillo J F, et al. Loess Plateau: From degradation to restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738:140206.
- [51] Sun Long, Zhang Guanghui, Liu Fa, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147:238-247.
- [52] 魏瑶瑶, 王俊, 张永旺, 等. 黄土高原不同植被类型土壤入渗特征研究[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2):16-20.
- Wei Yaoyao, Wang Jun, Zhang Yongwang, et al. Study on soil infiltration characteristics of different vegetation types on Loess Plateau [J]. *Journal of Yanan University (Natural Science Edition)*, 2021, 40(2):16-20.
- [53] Jiang Chong, Zhang Haiyan, Zhao Lingling, et al. Unfolding the effectiveness of ecological restoration programs in combating land degradation: Achievements, causes, and implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748:141552.
- [54] Bao Yuhai, Tang Qiang, He Xiubin, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Hydrology Research*, 2015, 46(2):212-221.
- [55] Li Jinlin, Bao Yuhai, Wei Jie, et al. Fractal characterization of sediment particle size distribution in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(9):2028-2038.
- [56] 罗鹏彪. 消落带植物单根水下抗拉拔研究[D]. 云南昆明: 云南农业大学, 2023.
- Luo Pengbiao. Study on single root underwater pull-out resistance of plants in hydro-fluctuation belt [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan Agricultural University, 2023.
- [57] 万丹, 周火明, 卢阳, 等. 金沙江干热河谷库区消落带植被恢复研究: 进展与展望[J]. *三峡生态环境监测*, 2021, 6(3):9-21.
- Wan Dan, Zhou Huoming, Lu Yang, et al. Progress and perspective of vegetation restoration in water-level-fluctuating zone of dry-hot valley reservoirs in Jinsha River [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2021, 6(3):9-21.
- [58] 全国人大常委会办公厅. 中华人民共和国黄河保护法[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 2022.
- General Office of Standing Committee of the National People's Congress. Yellow River Protection Law of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Democracy and Legal Press, 2022.
- [59] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(1):1-10.
- Li Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese Nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1):1-10.