

土壤改良剂在防治南方红壤区 土壤侵蚀中的应用研究进展

梁坤^{1,2}, 吴荣军¹, 唐俊杰², 朱绪超²

(1.南京信息工程大学生态与应用气象学院, 江苏南京 210044;

2.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展全国重点实验室, 江苏南京 211135)

摘要: [目的] 分析土壤改良剂在防治南方红壤区土壤侵蚀中的研究进展, 为南方红壤区土壤侵蚀防治和管理提供依据。[方法] 基于 RStudio 和 ArcGIS 可视化分析工具, 构建以“土壤改良剂”“土壤侵蚀”和“南方红壤区”为主题的关键词组合, 检索中国知网和 Web of Science 数据库中 1999—2024 年发表的相关文献。以发文数量、研究机构、发文章刊、改良剂应用频率、试验方法与施用年限、研究地点以及关键词聚类演变为研究对象, 开展定量分析。[结果] ① 1999—2024 年, 利用土壤改良剂防治侵蚀相关文献数量快速增长, 反映出学者对该领域的关注不断增强。② 秸秆、有机肥和生物炭在提高土壤有机质含量、增强团聚体稳定性及水分保持能力方面表现出显著效果, 成为最为频繁使用的材料。③ 相关研究主要集中在江西、湖南等土壤侵蚀严重的地区。④ 土壤改良剂分为天然改良剂、合成改良剂、天然—合成共聚物改良剂和生物改良剂 4 大类, 在增强土壤团聚体稳定性、抗侵蚀性能、水分保持能力和生态恢复方面的应用效果显著。[结论] 在南方红壤区, 建议未来研究重点关注改良剂与环境因子(如气候、土壤类型等)的交互作用, 开发新型复合改良剂, 全面评估其长期生态效应, 以促进农业生态系统的可持续管理。

关键词: 土壤改良剂; 南方红壤区; 土壤侵蚀; 文献计量分析

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2025)04-0222-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 梁坤, 吴荣军, 唐俊杰, 等. 土壤改良剂在防治南方红壤区土壤侵蚀中的应用研究进展[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 222-232. Liang Kun, Wu Rongjun, Tang Junjie, et al. Research progress on soil amendments for controlling soil erosion in red soil region of southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 222-232. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.011; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.011.

Research progress on soil amendments for controlling soil erosion in red soil region of southern China

Liang Kun^{1,2}, Wu Rongjun¹, Tang Junjie², Zhu Xuchao²

(1.School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 211135, China)

Abstract: [Objective] The research progress of soil conditioners in preventing and controlling soil erosion in the red soil area of southern China was analyzed, in order to provide theoretical references for the control and management of soil erosion in the red soil area of southern China. [Methods] Based on RStudio and ArcGIS visualization tools, Keyword combinations centered on ‘soil amendments’, ‘soil erosion’ and ‘red soil regions of southern China’ were constructed to retrieve relevant literature published between 1999 and 2024 from the China National Knowledge Infrastructure and Web of Science databases. A quantitative analysis was conducted, focusing on the number of publications, research institutions, journals, application frequency of amendments, experimental

收稿日期: 2025-01-13

修回日期: 2025-03-19

采用日期: 2025-03-19

资助项目: 中国科学院前瞻战略科技先导专项课题“红壤结构改良与季节性干旱适应原理及技术”(XDA0440202); 江西省自然科学基金项目“新型聚氨酯材料喷施对崩岗坡面土壤抗侵蚀能力的影响机制”(20224BAB203031); 中国科学院青年创新促进会会员项目“红壤区土壤侵蚀与水土保持”(2023327)

第一作者: 梁坤(1998—), 男(汉族), 安徽省滁州市人, 硕士研究生, 研究方向为南方红壤区土壤侵蚀防治。Email: liangkun23@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 朱绪超(1988—), 男(汉族), 山东省滕州市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: zhuxuchao@issas.ac.cn。

methods and application durations, study locations, and evolution of keywords. [Results] ① From 1999 to 2024, there was a rapid increase in the number of publications related to soil amendments for erosion control, reflecting the growing interest among researchers in this field. ② Straw, organic fertilizers and biochar emerged as the most frequently used materials because of their effectiveness in improving soil organic matter content, enhancing aggregate stability, and increasing water retention capacity. ③ Related studies were primarily focused on regions with severe soil erosion, such as Jiangxi and Hunan provinces. ④ Soil amendments could be categorized into four major types: natural, synthetic, natural-synthetic copolymer, and biological amendments. The practical effects of soil amendments in enhancing soil aggregate stability, erosion resistance, water retention capacity and ecological restoration were obvious. [Conclusion] In the red soil regions of southern China, future studies should focus on the interaction between improvers and environmental factors (such as climate and soil type), to develop new types of compound soil amendments, and comprehensively evaluate their long-term ecological effects to promote the sustainable management of agricultural ecosystems.

Keywords: soil amendments; red soil region of southern China; soil erosion; bibliometric analysis

土壤侵蚀是全球土壤退化与生态环境问题的核心因素,严重威胁农业生产力和生态系统稳定性。其定义为自然因素(如降水、风力)和人为活动(如农业耕作、采矿等)所引发的土壤剥蚀过程,导致土壤颗粒的流失^[1-2],进而直接导致耕作层有机质与养分流失,降低土壤肥力,长期侵蚀将引发不可逆的土地退化。在中国,土壤侵蚀问题尤为突出,已成为制约农业可持续发展的关键障碍之一^[3-4]。而南方红壤区作为典型的侵蚀敏感区域,由于独特的地理与气候条件,土壤侵蚀问题更加复杂且严峻。该区高温多雨的气候特征导致雨季期间强烈的地表径流,进一步加剧了土壤颗粒的流失^[5]。

在此背景下,多种水土保持措施被广泛应用于不同的土壤与气候环境中,如植物措施、耕作管理及工程措施等^[6-7]。已有研究表明,长期实施水土保持策略可有效改善红壤区典型流域的径流泥沙特性,降低土壤流失量,从而提升生态系统的稳定性^[8-9]。但因季节性干旱和降雨集中等因素,红壤坡耕地在作物生长初期仍面临较高的土壤侵蚀风险^[10-11],导致农业生产能力下降。

为有效应对关键阶段的土壤侵蚀问题,施用土壤改良剂作为重要防治手段而备受关注^[12]。近年来,天然、合成、天然-合成共聚物及生物改良剂等多种类型的土壤改良剂在优化土壤理化性质和提升抗侵蚀性能研究方面取得了显著进展,且不同类型的改良剂在优化土壤结构和增强抗侵蚀能力方面各具侧重点与适用性^[13]。然而,针对南方红壤区不同类型土壤改良剂在防治土壤侵蚀过程中的研究进展、防治机理及应用效果等方面尚缺乏系统的梳理与综合评估。

因此,本文基于文献计量学方法,通过RStudio和ArcGIS软件对该领域进行定量分析和可视化展

示,同时评估了不同类型土壤改良剂在南方红壤区侵蚀防治中的优缺点与作用机制,探讨土壤改良剂对土壤理化特性和水土保持的影响。最后,针对南方红壤区土壤改良剂的复合配置与应用策略、新材料研发以及环境影响评价提出相关建议,为该区水土保持和农业可持续发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

南方红壤区位于中国东南部(108°—120°E, 24°—30°N),涵盖江西、湖南、福建和广西等省区。根据国家红壤改良工程技术研究中心提供的数据显示,中国红壤区面积约占国土总面积的22.7%^[14-15]。该区域处于亚热带季风气候区,年均气温15~20℃,年降水量1000~2000 mm,降水主要集中于夏季,雨量大且分布不均,暴雨频发,常引发严重的土壤侵蚀^[16]。区域内红壤主要发育于花岗岩和砂岩母质之上,土壤呈酸性,黏重且存在结构性障碍,天然抗侵蚀能力较弱^[17]。地形以丘陵和低山为主,坡度陡峭,以江西省中部丘陵区为例,坡面侵蚀与沟道径流耦合作用显著,成为土壤侵蚀的重点区域^[18]。尽管区域内天然植被以亚热带常绿阔叶林为主,但随着农业扩张、城市化推进及基础设施建设,天然植被遭到破坏,地表植被覆盖度下降,裸露地表面面临更高的侵蚀风险^[19-20]。

1.2 数据来源

本研究的数据主要来源于中国知网(CNKI)与Web of Science两大权威数据库,覆盖了自1999—2024年期间国内外关于南方红壤区土壤改良剂在土壤侵蚀防治方面的应用研究。为系统获取该领域的最新进展与高质量数据,制定如下具体检索策略。

(1) 在CNKI数据库中,采用多层次关键词组合策略构建了3个主题检索模块:模块1聚焦于“土壤改

良剂”,关键词包括“改良剂”“添加剂”“调理剂”“材料”“生物炭”及“有机肥”等;模块2专注于“土壤侵蚀及水土保持”过程,包含关键词“侵蚀”“土壤侵蚀”“水土流失”及“水土保持”;模块3聚焦于“南方红壤区”,采用“红壤”“红壤区”及“南方”等地理关键词。

(2)在 Web of Science 数据库中,结合布尔逻辑运算符和多层次关键词组合,同样设置了3个主题模块:模块1围绕土壤改良剂及其调理效应,选取“conditioner”或“amendment”等核心关键词;模块2聚焦于“土壤侵蚀及水土保持”过程,使用“erosion”“soil loss”“soil and water conservation”及“sediment”等关键词;模块3定位于“南方红壤区”,采用“red soil”“south China”或“southern China”等地理关键词。

最终,通过上述精细化检索策略,从两大数据库共筛选出70篇符合条件的文献,作为数据分析的基础,为研究提供了全面而可靠的数据支持。

1.3 分析方法

本研究基于文献计量学方法,对纳入的70篇文献进行梳理与总结。文献筛选过程中借助EndNote X9完成去重和筛选,确保数据的准确性与有效性;而在数据分析阶段,则使用RStudio 4.3.3进行关键词共现、文献耦合等计量分析,揭示研究领域的热点议题与发展动态。与此同时,利用ArcGIS 10.8.1软件对研究地点进行空间分析与可视化,直观展示了其在不同区域的分布特征。

2 结果与分析

2.1 文献计量分析

2.1.1 发文量

图1显示,过去20 a间本研究领域的文献数量呈

明显的增长趋势。具体而言,2010年之前,相关文献的发表量相对较低,表明土壤改良剂在红壤区的研究仍处于初步探索阶段。自2010年起,文献数量稳步增长,反映出该领域的研究逐渐得到关注和发展。尽管自2016年以后,研究文献的发表量出现一定波动,但总体趋势仍保持上升,表明该领域的研究持续获得学术界和社会的广泛关注,并逐步进入更深的探索阶段。

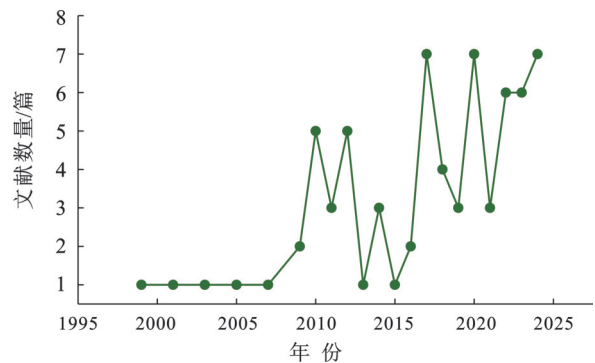


图1 1999—2024年相关研究领域发文数量变化趋势
Fig.1 Trend of number of publications in relevant research area from 1999 to 2024

2.1.2 主要研究机构

图2展示了中英文期刊在相关研究领域中,研究机构合作关系的网络结构。通过对比分析可以看出,图2a英文期刊的研究机构合作网络具有明显的国际化特征,合作关系遍布全球,涵盖了来自欧洲、美国及其他地区的多个知名学术机构。特别是 Univ. Nottingham, Univ. Coll. Dublin 等欧洲高校,以及 Lincoln Univ. 等美国院校,与中国多个机构(如 Nanjing Agri. Univ., Fujian Agri. For. Univ.)的紧密合作,显示了英文期刊跨国界合作的广泛性与频繁性。

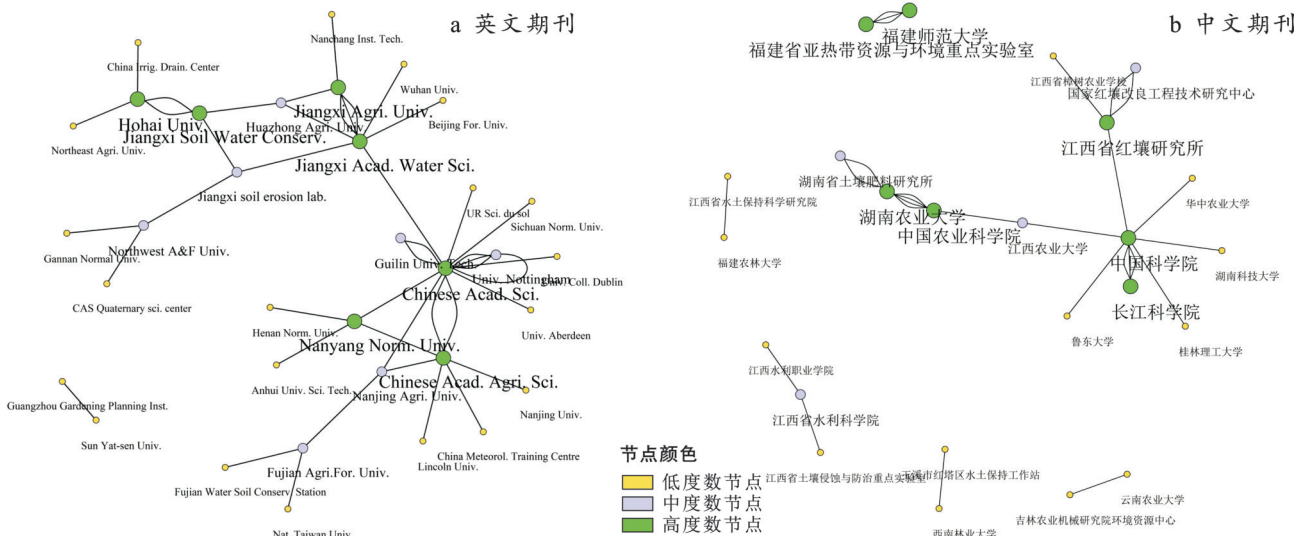


图2 相关研究领域中英文期刊发文机构知识图谱
Fig.2 Knowledge map of publishing institutions in relevant research area in Chinese and English journals

相对而言,图 2b 中文期刊的研究机构合作网络则更集中于国内。核心机构如中国农业科学院、中国科学院等,处于合作网络的中心地带,表明该领域的研究重心主要集中在中国境内。中文期刊中,尤其以长江科学研究院、江西农业大学等机构之间的合作关系较为密切。然而,相较于英文期刊,中文期刊的国际合作相对较少,合作机构的数量和分布较为局限,表明中文期刊的影响力主要集中在国内,国际化水平尚有待提升。

2.1.3 发文期刊和研究方向

图 3a 显示了纳入的 70 篇文献在期刊与研究方向的分布特征,这些文献覆盖 37 种期刊(不含学位论文)。其中《水土保持学报》、*Catena* 和 *Water* 为主要发表来源,表明这些期刊在水土保持研究中的重要地位与广泛影响力。《水土保持学报》在该领域的发文数量排名第一,体现了国内研究机构在该领域中

的主导地位;而 *Catena* 和 *Water* 作为国际期刊,对全球水土保持和土壤改良研究的推动发挥了重要作用,尤其在跨学科的应用研究中占有举足轻重的地位。图 3b 展示了相关研究涉及多个研究方向,其中水文学占比最高(31.6%),表明水文过程、土壤水分管理和土壤侵蚀防治等问题是该领域研究的核心。土壤科学(28.1%)位居第二,强调了土壤改良、土壤侵蚀控制及其与农业生产的关系。农业科学(26.3%)也占有较大比例,反映了农业生产环境对土壤改良剂应用的需求。尽管环境科学(12.3%)和生态学(1.7%)的占比相对较小,但也凸显了土壤改良剂对生态系统和环境保护的重要作用,尤其是在减缓土壤退化和改善环境质量方面的潜力。此外,中文与英文文献的比例分别为 61.4% 和 38.6%,说明南方红壤区土壤改良研究不仅在国内学术界存在广泛影响,同时在国际范围内也受到高度关注。

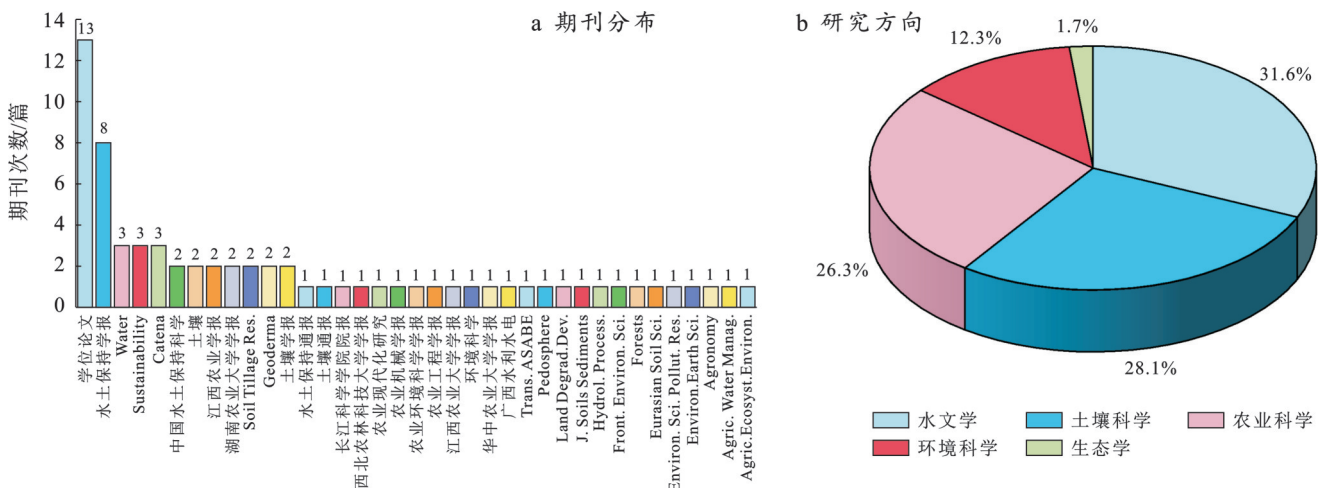


图 3 相关研究领域期刊分布(a)和研究方向(b)

Fig.3 Journal distribution (a) and research directions (b) of related study area

2.1.4 应用频率

图 4 展示了多种土壤改良剂在相关研究中的应用频次分布,天然改良剂中秸秆(23 次)与有机肥(15 次)受到的关注度最高,凸显其在土壤改良领域的重要地位。秸秆作为一种常见的有机物质,可提供丰富的有机质和营养成分,有助于提高土壤肥力、改善土壤结构并促进微生物活性,已成为研究的热点。与此同时,有机肥的使用量较大,表明其在土壤改良中广泛应用,能够提升土壤有机物含量,改善土壤水分保持能力,从而对土壤结构与生态环境产生显著的正面影响。处于中等频次的合成改良剂包括 PAM、调理剂和 NPK 复合肥(7~9 次),表明它们在特定应用场景下也具有重要的研究价值。PAM 作为一种常用于土壤水分保持、抗侵蚀和土壤结构改良

的合成聚合物,其研究频率虽然较天然改良剂低,但仍具有一定的应用价值。调理剂和 NPK 复合肥也被用于改善土壤的养分平衡与结构特性,尤其在处理特定土壤类型或改良功能中发挥了其独特优势。然而,生物改良剂(如 AMF)则出现频次较低,显示出相对较少的研究关注度。AMF 作为一种重要的生物改良剂,能够促进植物根系的营养吸收,增强植物抗逆性及改善土壤结构,但其使用频次较低的原因可能与其适用范围有限,以及目前的研究尚处于初步阶段有关。随着研究的深入,生物改良剂在土壤改良中的潜力可能会得到进一步开发,尤其是在提高土壤肥力、减少环境污染等方面的应用。

2.1.5 应用年限与试验方法

图 5 展示了本领域文献所涉及试验的持续时间

及方法选择。图 5a 显示,大部分试验为短期(≤ 5 a),整体分布相对集中,表明短期试验在该领域中占据主导地位。这类试验通常用于初步探索和验证基础假设,因此在试验设计中所涉及的变量较少,周期较短。而中期(5~15 a)与长期(> 15 a)试验的持续时间则呈现较大波动,数据分布更为分散,表明这些试验通常涉及更多的外部变量和长期观察,且试验条件复杂,从而导致其持续时间具有更高的变异性。图 5b 进一步揭示了试验方法与应用年限之间的关系。田间试验覆盖了短期、中期和长期等多个时长范围,反映了田间试验通常需要较长的时间跨度来捕捉不同时间尺度下土壤、作物等系统的演变。相对而言,室内模拟试验则主要集中在短期范围,数据分布较为集中,表明室内模拟试验多用于控制条件下

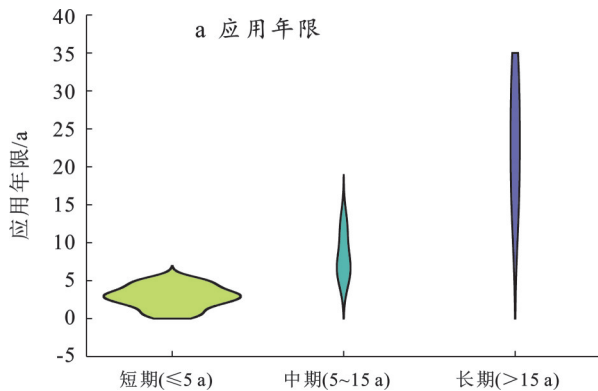


图 5 相关研究的应用年限(a)和试验方法(b)

Fig.5 Application duration (a) and experimental methods (b) of related studies

2.1.6 研究地点

图 6 显示了该领域文献研究样点分布($n=70$),涵盖了江西、湖南、广西和福建等省份,清晰呈现出不同区域在红壤改良研究上的聚集程度与重点差异。结果表明,江西省(47.1%)与湖南省(12.9%)拥有最高的研究占比,这不仅反映了两地在红壤面积分布、侵蚀程度以及生态脆弱性等方面的典型性,也体现了这些地区在相关科研与应用上投入更为集中、积累更为深入。相比之下,湖北、广东及云南等省份的研究占比相对较低,但仍显示出南方红壤区改良研究的广泛分布与整体关注度。

2.1.7 研究热点

关键词共现频率的和弦图(图 7)展示了前 30 个关键词之间的共现关系。图 7 中体现了当前研究主要围绕“水土保持”“土壤侵蚀”及“团聚体稳定性”等核心关键词展开,这反映了学术界对土壤改良剂在调控径流侵蚀、改善团聚体稳定性及提高土壤结构抗性方面的高度关注。此外,“坡体”“覆盖”和“降雨”等关键词的突出,表明研究重点不仅包括土壤改良剂对土

壤结构的直接影响,还涉及其在不同降雨强度和地形条件下对侵蚀防治的作用机制。同时,“保水”“有机碳”和“退化”等关键词反映了土壤水分保持和有机覆盖物对红壤区生态系统功能的重要作用。

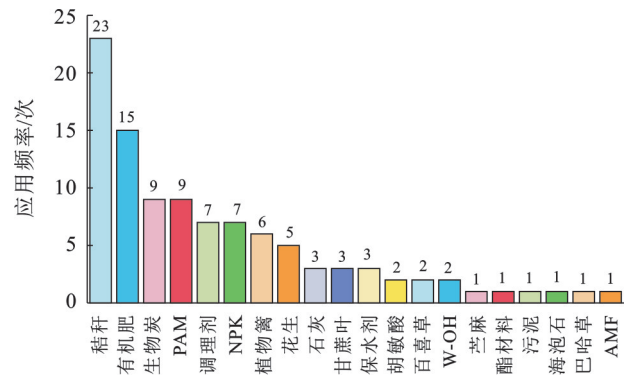
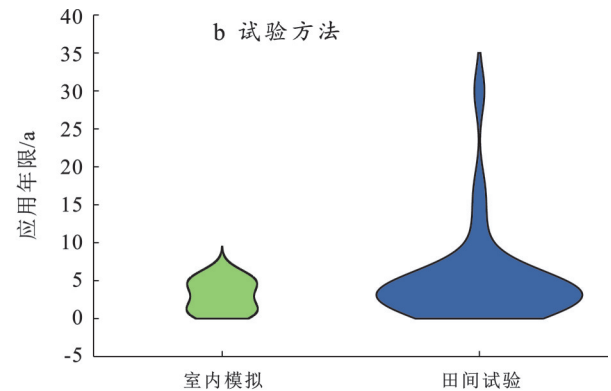


图 4 不同土壤改良剂应用频率

Fig.4 Frequency distribution of different soil amendments



壤结构的直接影响,还涉及其在不同降雨强度和地形条件下对侵蚀防治的作用机制。同时,“保水”“有机碳”和“退化”等关键词反映了土壤水分保持和有机覆盖物对红壤区生态系统功能的重要作用。

2.2 土壤改良剂类别、防治机理和应用效果

2.2.1 土壤改良剂的类别

土壤改良剂主要通过改善土壤的物理、化学与生物学特性^[21](表 1),从而提升土壤的生产力与生态功能。在南方红壤区,相关研究集中于天然改良剂、合成改良剂、天然-合成共聚物改良剂及生物改良剂四大类。各类改良剂在优化土壤结构和增强抗侵蚀能力方面展现出显著效果,具体应用效果因改良剂类型而异^[22-23]。

2.2.2 土壤改良剂的防治机理

南方红壤区因其结构疏松、肥力低下及降雨侵蚀强度大的特点,面临严重的土壤侵蚀风险^[24]。为应对这一挑战,各类土壤改良剂被广泛应用于提升土壤结构稳定性和增强抗侵蚀能力。以下从化学、物理和生物 3 个层面综合分析,其主要防治机理如下。

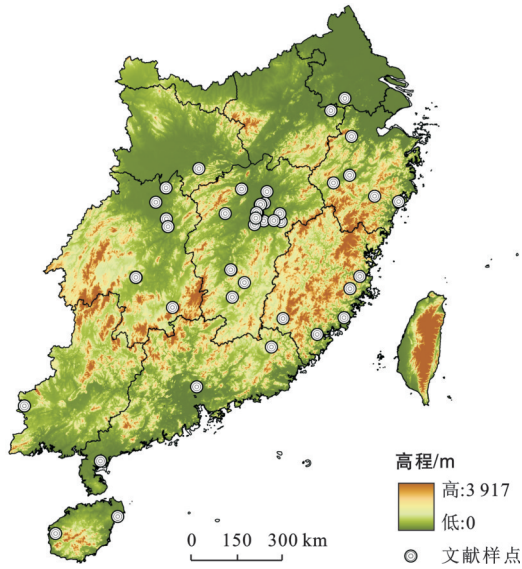


图 6 相关研究地点分布 (n=70)
Fig.6 Distribution of relevant study locations (n=70)

天然改良剂通过增加土壤有机质含量,显著提高阳离子交换量(CEC),增强土壤的团聚体稳定性,从而改善土壤水分和养分的保持能力。例如,生物炭的施用通过吸附和稳定土壤中的铁氧化物与芳香族化合物,增强土壤碳库的稳定性,同时降低了径流和侵蚀造成的土壤养分的流失^[25-26]。秸秆还田作为一种有效的土壤改良措施,不仅通过增加速效钾和氮等养分改善土壤肥力,还通过地表覆盖显著减少雨滴对地表的直接冲击^[27]。

合成改良剂通过分子间桥接作用形成保护膜,在短时间内提高土壤的抗侵蚀性能。PAM的施用显著增加了1~2 mm和2~4 mm水稳性团聚体的含量,从

而显著提升土壤抗冲刷能力^[28]。此外,某些新型材料(如W-OH胶体材料)通过填充孔隙和增强表层结构稳定性,从而减少降雨引发的水力侵蚀^[29-30]。

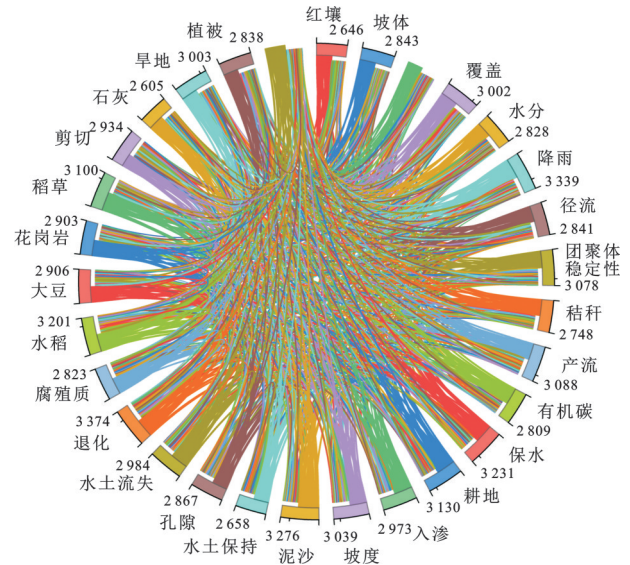


图 7 相关研究领域关键词共现和弦图
Fig.7 Keyword Co-occurrence chord diagram in relevant research area

天然与合成改良剂的联合应用可实现物理和化学改良的协同效应。例如,PAM与秸秆联合施用能够显著提高大团聚体比例,同时优化微生物群落功能,进而显著降低土壤侵蚀风险^[31]。生物改良剂通过调控土壤微生物群落和分泌有机物质显著增强土壤的水稳性和抗侵蚀能力。例如,AMF分泌的多糖与有机酸可促进土壤微团聚体的形成,并增强土壤水分保持能力,同时改善土壤的抗冲刷性^[32]。

表 1 土壤改良剂分类

Table1 Classification of soil amendments

土壤改良剂	物质组成	优点	缺点
天然改良剂	石灰石、膨润石、生物炭、粉煤灰、有机肥、作物秸秆、多糖、纤维素、粉泥炭等	可再生性强,原料易获取且环境友好,副作用风险最低	见效周期长,来源有限,适应性受限,劳动力投入较大
合成改良剂	聚丙烯酰胺(PAM)、保水剂、W-OH材料、聚乙烯醇树脂、聚乙烯醇、聚乙二醇、脲醛树脂等	效果显著且迅速,更为精确的调控能力	成本较高,污染风险高,某些土壤类型中效果有限
天然-合成共聚物改良剂	腐殖酸-聚丙烯酸、纤维素-丙烯酰胺、淀粉-丙烯酰胺等	性能均衡,可控性和定制性强	成本较高,长期效应可能不足,施用和管理较为复杂
生物改良剂	微生物接种剂、丛枝菌根真菌(AMF)、耗氧堆制茶、蚯蚓等	环保且具有可持续性,较好的生态效益,多功能性	效果较慢,环境依赖性极强,技术要求较高,长期效果存在不确定性

2.2.3 土壤改良剂的应用效果

针对南方红壤区严峻的土壤侵蚀问题,各类土壤改良剂在提高土壤团聚体稳定性,减少径流和泥沙流失方面表现出显著效果^[33](表2)。

以下从天然改良剂、合成改良剂、天然-合成改

良剂组合以及生物改良剂的应用效果方面展开探讨。

(1)天然改良剂因其绿色、可再生等特点在改善土壤结构和增强抗侵蚀性能方面具有重要作用^[34]。研究表明,生物炭施用可使平均重量直径提高

85.1%，土壤渗透系数提高 22.0%^[35-36]。此外，秸秆还田可使土壤可蚀性因子下降 42.0%，平均重量直径下降 13.3%，年径流量降低 76.3%，表面径流量降低 99.7%~100%。在强降雨条件下，有机肥施用可提供丰富的可溶性养分与有机胶结物质，能有效改善土壤团聚体结构，展现出卓越的抗侵蚀性能^[37]。

(2) 合成改良剂以其短时间内快速提高土壤稳定性和抗侵蚀性能而备受关注。研究表明，保水剂可使

产流量减少 59.0%，产沙量下降 66%^[38]。保水剂在吸水膨胀后于土壤表面形成保护膜，不仅减少水分蒸发，还能显著降低坡面径流量和泥沙流失^[39]。

此外，浓度为 3%~5% 的 W-OH 材料通过在土壤表层形成胶体层填充孔隙，可延长初始径流生成时间，并将径流量和产流量分别降低 190.0% 和 73.9%。然而，高浓度条件下，W-OH 材料可能导致产流量的增加，因此需根据土壤类型和降雨强度优化用量^[40]。

表 2 不同土壤改良剂的应用效果

Table 2 Application effects of different soil amendments

土壤改良剂	指标	应用效果	文献来源
生物炭	MWD	MWD ↑ 85.1%	He Lili ^[26]
生物炭	土壤渗透系数	土壤渗透系数 ↑ 22.0%	石芬芬等 ^[33]
秸秆	K 因子	K 因子 ↓ 42%	Zhang Yan 等 ^[41]
秸秆	MWD	MWD ↓ 13.3%	Chen Xiaoan 等 ^[32]
秸秆	径流量	年径流量 ↓ 76.3%；表面径流量 ↓ 99.7%~100.0%	Chen Xiaoan 等 ^[32] ；Yang Luyang 等 ^[34]
秸秆	产沙量	产沙量 ↓ 85.1%	Chen Xiaoan 等 ^[32]
保水剂	产流量	产流量 ↓ 59%	陈诗婷等 ^[27]
保水剂	产沙量	产沙量 ↓ 66%	陈诗婷等 ^[27]
W-OH 材料	径流量 产沙量	中小雨时减沙效率 40.2~53.8%、暴雨时 3% 浓度减沙 37.4~48.5%，5~7% 浓度达 55.7~65.3%；红黏土、崩岗土径流率分别 ↑ 190.0% 和 37.3%；产沙量分别 ↓ 73.9% 和 62.1%	Qin Xiaochun ^[38] ；王欣等 ^[29] ；Zhu Xuchao 等 ^[28]
AMF	径流量 产沙量	径流量 ↓ 产沙量 ↓	Zhang Lichao ^[30]
秸秆, 有机肥	产沙量	产沙量 ↓	Wang Yi ^[8]

注：K 为土壤可蚀性因子；MWD 为平均重量直径；↑ 表示提高；↓ 表示降低。

天然与合成改良剂的组合使用展现了显著的协同增效作用。例如，PAM 与秸秆联合施用不仅能够增强土壤结构稳定性，还能通过物理覆盖和化学交联作用减少径流量，降低泥沙流失量^[42]。即使在高强度降雨条件下，此类组合改良剂仍表现出优异的抗侵蚀性能。这种协同效应充分发挥了天然改良剂的长期稳定性与合成改良剂的短期效用。

生物改良剂通过激活土壤生态功能，在抗侵蚀和结构改良方面发挥了重要作用。例如，AMF 通过与草本植物结合，能进一步优化微生物群落结构，增强土壤的碳库稳定性。试验研究表明，AMF 施用使大团聚体比例显著提高，优化了土壤孔隙分布，从而显著降低泥沙流失量^[43]。

3 展望

基于对南方红壤区土壤侵蚀防治中土壤改良剂

应用的系统梳理，结合现有文献的综合分析，针对南方红壤区的典型问题及土壤改良剂应用的现存不足，未来研究应聚焦以下 4 个核心方向，以期突破当前技术瓶颈，推动改良剂应用的高效化与可持续发展。

(1) 探索土壤改良剂协同效应及精准施用技术：当前研究多集中于单一改良剂或其单一功能的开发与应用，对多种改良剂的协同作用及复合功能的研究尚显不足。未来应加强不同改良剂间的复配研究，通过合理组合与配置实现对土壤物理、化学及生物属性的综合改良。例如，将生态友好的天然改良剂与高效性能突出的合成改良剂相结合，可有效兼顾环境可持续性与高效性^[44]。此外，精准施用技术应与改良剂应用体系深度耦合，基于不同区域的土壤特性与作物需求，动态优化改良剂的施用剂量与施用时机，以提高资源利用效率，最大化改良效果，同时减少资源浪费和潜在环境风险^[45]。

(2) 开发多功能土壤改良剂与新型材料应用:现有土壤改良剂虽在提升土壤肥力和改善结构方面已取得显著进展,但在应对南方红壤区强降雨导致的侵蚀问题方面仍存在较大局限性。未来研究应着重开发多功能改良剂,并积极引入新型材料和技术^[46]。具体可从以下几方面开展:依托纳米材料与生物技术,研发兼具高效与可降解特性的改良剂,增强土壤结构稳定性,调控微生物群落功能,并显著降低泥沙流失。研发具有保水、抗旱及稳固土壤结构特性的土壤改良剂,以应对极端气候条件下的土壤侵蚀与劣化^[47]。利用农业废弃物(如秸秆、生物质炭)或工业副产物(如钢渣、赤泥)制备低成本、可再生的多功能改良剂,实现废弃物资源化利用,同时提高土壤抗冲刷能力,兼具经济效益与生态效益^[48]。

(3) 加强土壤改良剂的长期效应与环境风险评估:当前关于土壤改良剂的研究多聚焦其短期效应,而对长期累积效应及其潜在环境风险的系统认识仍较为薄弱^[49]。未来研究需加强对改良剂长期施用效应的动态监测与综合评价,主要包括:有机土壤改良剂的持续施用可能显著影响土壤碳氮循环动态及微生物群落功能,其对土壤团聚体稳定性和抗侵蚀性能的持久性贡献需进一步深入评估^[41]。而在高降雨条件下,无机土壤改良剂的过量或不当施用可能诱发土壤盐碱化、重金属迁移累积等环境问题,需结合区域特性优化其施用策略以控制环境风险^[50]。因此,有必要深入研究土壤改良剂在红壤中的迁移转化机制及其对土壤侵蚀防治的长期影响,构建涵盖土壤结构稳定性、径流泥沙和生态安全等关键指标的综合评估体系,为南方红壤区水土保持政策的制定与实践提供科学支撑^[51]。

(4) 融合智能技术以优化改良剂应用体系:借助人工智能与遥感监测技术,可实现土壤状态的实时动态监控及改良剂施用策略的优化调整,为改良剂的精准高效施用提供技术支持^[52]。具体可从以下方面开展研究:基于人工智能技术,建立改良剂施用效果预测模型,精准优化施用方案,提高适应性及使用效率。结合遥感监测与大数据分析技术,动态评估土壤侵蚀状况及改良剂效能。联合护坡植物配置和地表覆盖措施,进一步增强土壤抗蚀性和水土保持成效,同时缓解干旱与极端气候对土壤质量与结构稳定性的威胁。

4 结论

本文通过系统梳理土壤改良剂在南方红壤区土壤侵蚀防治中的研究进展,揭示了不同类型土壤改

良剂在调控土壤侵蚀、增强土壤团聚体稳定性和水分保持能力方面的显著作用。同时建议未来研究重点应关注改良剂与环境因子的交互作用,开发新型复合改良剂,全面评估其长期生态效应。与前期研究相比,本文在数据分析方法上进行了创新,系统整合了现有研究成果,深入探讨了改良剂在不同环境下的适应性差异。除验证已有理论的有效性外,还提出了改良剂间协同作用及其对土壤生物活性长期影响的新假设,为红壤改良和侵蚀防治领域提供了新的研究视角。尽管如此,本文仍存在一定局限性,尤其在地区差异和长期应用效果评估方面仍需深入剖析。因此,未来研究应加强实地验证与长周期监测,深入探索改良剂对土壤侵蚀的持久影响。总体而言,土壤改良剂在南方红壤区土壤侵蚀防治中的应用具有重要科学意义和实践价值,为该地区农业生产和生态恢复提供了理论依据,并为未来相关领域的研究开辟了新的方向。

参考文献(References)

- [1] 王赫,陈文祥,李会光,等.南方红壤区典型水土流失治理小流域的洪水径流泥沙特征[J].农业工程学报,2023,39(15):86-93.
Wang He, Chen Wenxiang, Li Huiguang, et al. Runoff and sediment characteristics of flood events in a typical soil and water conservation watershed in the red soil region of southern China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (15) : 86-93.
- [2] Li Jianxing, Yan Keyu, Duan Qingsong, et al. Effects of tillage practices on water storage and soil conservation in red soil slope farmland in southern China [J]. Scientific Reports, 2024,14:28781.
- [3] Liu Gang, Zheng Fenli, Wilson G V, et al. Three decades of ephemeral gully erosion studies [J]. Soil and Tillage Research, 2021,212:105046.
- [4] 袁再健,马东方,聂小东,等.南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J].土壤学报,2020,57(1):12-21.
Yuan Zaijian, Ma Dongfang, Nie Xiaodong, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of south China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(1):12-21.
- [5] Xue Hongpan, Zhou Xin, Tu Luyao, et al. Climate-vegetation-erosion interactions revealed by the sediments of Huguangyan Maar Lake, Southern China [J]. Catena, 2023,231:107276.
- [6] Liu Zhao, Deng Kenan, Zheng Haijin, et al. Effects of tillage practices on runoff and soil losses in response to different crop growth stages in the red soil region of

- southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(5):2199-2212.
- [7] 万怡国, 谢方杰, 陈晓安. 红壤区不同水土保持措施对土壤抗蚀性的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6):76-81.
Wan Yiguo, Xie Fangjie, Chen Xiaoan. Effects of different soil and water conservation measures on soil erosion resistance in red soil region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6):76-81.
- [8] Wang Yi, Cao Longxi. The effects of tillage practices on interrill erosion in the red soil region of China [J]. *Transactions of the ASABE*, 2020, 63(1):211-219.
- [9] 梁美霞, 章鑫强, 林炳青. 南方红壤侵蚀流域不同情景措施的减沙效应模拟[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(10):177-185.
Liang Meixia, Zhang Xinqiang, Lin Bingqing. Simulation of sediment reduction effect under different scenarios in red soil erosion watershed in south China [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(10):177-185.
- [10] Mao Yanting, Hu Wei, Chau Henrywai, et al. Combined cultivation pattern reduces soil erosion and nutrient loss from sloping farmland on red soil in southwestern China [J]. *Agronomy*, 2020, 10(8):1071.
- [11] Wang He, Wang Xiaopeng, Yang Shuncheng, et al. Water erosion response to rainfall type on typical land use slopes in the red soil region of southern China [J]. *Water*, 2024, 16(8):1076.
- [12] Ma Yichun, Liu Yaojun, Tian Liang, et al. Effects of rainfall pattern and soil surface roughness on surface-subsurface hydrological response and particle size distribution of red soil slope [J]. *Catena*, 2023, 232:107422.
- [13] Zhao Lulu, Fang Qian, Algeo T J, et al. Formation of plinthite mediated by redox fluctuations and chemical weathering intensity in a Quaternary red soil, southern China [J]. *Geoderma*, 2021, 386:114924.
- [14] 蔡旭东, 周怡雯, 刘窑军, 等. 南方红壤区坡耕地不同耕作措施综合生态效益评价[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):281-287.
Cai Xudong, Zhou Yiwen, Liu Yaojun, et al. Evaluation on comprehensive ecological benefit of different tillage measures on sloping land in red soil area of south China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):281-287.
- [15] 袁厚海. 南方红壤区水土流失治理存在的问题与对策[J]. *云南水力发电*, 2023, 39(9):5-8.
Yuan Houhai. Problems and countermeasures of soil and water loss control in southern red soil region [J]. *Yunnan Water Power*, 2023, 39(9):5-8.
- [16] Liao Qiang, Li Tong, Liu Deer. Evolutionary patterns and influencing factors of relationships among ecosystem services in the hilly red soil region of southern China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(4):360.
- [17] 黄俊, 金平伟, 姜学兵, 等. 南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17):106-114.
Huang Jun, Jin Pingwei, Jiang Xuebing, et al. Model construction and verification of vegetation cover and management factor in southern red soil region of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17):106-114.
- [18] Wu Jieling, Zha Ruibo, Zha Xuan, et al. Regulatory mechanism of soil and water conservation measures on understorey erosion in a subtropical hilly region [J]. *Catena*, 2024, 246:108427.
- [19] Tang Chongjun, Liu Yu, Li Zhongwu, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129:107956.
- [20] 王修文, 于书霞, 史志华, 等. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(17):7002-7014.
Wang Xiuwen, Yu Shuxia, Shi Zhihua, et al. Responses of tradeoffs and synergies among ecosystem services to grain-for-green project in the red soil region, southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17):7002-7014.
- [21] 李菊, 杨永志, 甘良, 等. 土壤改良剂和有机肥对旱改水砖红壤稻田的改良效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(4):91-98.
Li Ju, Yang Yongzhi, Gan Liang, et al. Effects of soil amendments and organic fertilizer application on latosol soil properties on a paddy field converted from dry land [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(4):91-98.
- [22] 刘芳禧, 方畅宇, 庾振宇, 等. 绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(6):1616-1627.
Liu Fangxi, Fang Changyu, Yu Zhenyu, et al. Effects of green manure, rice straw return and lime combination on soil acidity and rice yield [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(6):1616-1627.
- [23] 杨馨, 徐灵颖, 夏龙龙, 等. 南方酸性红壤区长期秸秆炭化还田的土壤固碳效应差异[J/OL](2025-02-01). *土壤学报*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20241129.0911.002>.
Yang Xin, Xu Lingying, Xia Longlong, et al. Differences in soil carbon sequestration effects of long-term carbonization straw return on soil in acidic red soil areas in

- southern China [J/OL] (2025-02-01). *Acta Pedologica Sinica*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20241129.0911.002>.
- [24] Zhao Liwen, Zheng Haijin, Wang Lingyun, et al. The fate and balance of nitrogen on a sloped peanut field on red soil [J]. *Agronomy*, 2022, 12(10):2388.
- [25] 唐倩,王克勤,宋娅丽,等.有机肥对滇中红壤烤烟坡耕地氮磷流失的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(6):106-116.
- Tang Qian, Wang Keqin, Song Yali, et al. Effects of organic fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in flue-cured sloping farmland of red soil in central Yunnan [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(6):106-116.
- [26] He Lili, Zhao Jin, Yang Shengmao, et al. Successive biochar amendment improves soil productivity and aggregate microstructure of a red soil in a five-year wheat-millet rotation pot trial [J]. *Geoderma*, 2020, 376:114570.
- [27] 陈诗婷,查瑞波,毛兰花,等.施用保水剂对花岗岩红壤坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):44-49.
- Chen Shiting, Zha Ruibo, Mao Lanhua, et al. Effects of SAP application on slope erosion process of granite red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5):44-49.
- [28] Zhu Xuchao, Liang Yin, Tian Zhiyuan, et al. Effect of W-OH, a hydrophilic polyurethane polymer, in controlling erosion of two typical erodible soils in southern China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(21):1163.
- [29] 王欣,朱绪超,梁音,等.新型W-OH材料对南方典型侵蚀土壤入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(6):123-131.
- Wang Xin, Zhu Xuchao, Liang Yin, et al. Effects of new polyurethane material (W-OH) on infiltration and runoff and sediment yield of two typical erodible soils in south China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6):123-131.
- [30] Zhang Lichao, Xiao Tingqi, Liu Hongguang, et al. Effects of AM fungi and grass strips on soil erosion characteristics in red sandstone erosion areas in southern China [J]. *Forests*, 2022, 13(9):1351.
- [31] 王洪雨,陆朝阳,薛婷婷,等.紫穗槐接种AM真菌对红壤林下侵蚀劣地的影响研究[J].核农学报,2024,38(11):2202-2210.
- Wang Hongyu, Lu Zhaoyang, Xue Tingting, et al. Study on the effect of *Amorpha fruticosa* L. inoculated with AM fungi on erosion-degraded forestland in red soil [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(11):2202-2210.
- [32] Chen Xiaolan, Liang Ziwei, Zhang Zhanyu, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in red soil slope farmland under natural rainfall [J]. *Sustainability*, 2020, 12(8):3417.
- [33] 石芬芬,莫明浩,胡皓,等.施用生物炭对红壤坡地土壤性质改良效果的试验研究[J].江西农业学报,2023,35(1):94-98.
- Shi Fenfen, Mo Minghao, Hu Hao, et al. Experimental study on improvement effect of biochar application on soil properties of red soil slope land [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(1):94-98.
- [34] Yang Luyang, Duan Jian, Peng Lang, et al. Effects of straw mulching on near-surface hydrological process and soil loss in slope farmland of red soil [J]. *Water*, 2022, 14(21):3388.
- [35] Gao Zechao, Xu Qinxue, Si Qin, et al. Effects of different straw mulch rates on the runoff and sediment yield of young citrus orchards with lime soil and red soil under simulated rainfall conditions in southwest China [J]. *Water*, 2022, 14(7):1119.
- [36] 何峥旋,魏圆慧,黄昭昶,等.猪粪配施菌剂对侵蚀红壤碳氮组分及竹柏生长的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2024,53(3):394-400.
- He Zhengxuan, Wei Yuanhui, Huang Zhaochang, et al. Effect of pig manure combined with microbial agent on carbon and nitrogen fraction of eroded red soils and growth of *Nageia nagi* [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2024, 53(3):394-400.
- [37] Gou Hao, Liao Jin, Du Fan, et al. Soil remediation of subtropical garden grasses and shrubs using high-performance ester materials [J]. *Sustainability*, 2022, 14(6):3228.
- [38] Qin Xiaochun, Ni Anchen, Zhang Nan, et al. Erosion control and growth promotion of W-OH material on red clay highway slopes: A case study in south China [J]. *Sustainability*, 2021, 13(3):1144.
- [39] 葛佩琳,孔召玉,夏金文,等.丛枝菌根真菌对3种水土保持草本植物生长和土壤团聚体的影响[J].草原与草坪,2024,44(1):58-68.
- Ge Peilin, Kong Zhaoyu, Xia Jinwen, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and soil aggregates of three soil and water conservation herbs [J]. *Grassland and Turf*, 2024, 44(1):58-68.
- [40] 刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.

- Liu Jiaoxian, Cui Jun, Liu Hongbao, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022,12(1):173-184.
- [41] Zhang Yan, Qin Xin, Qiu Quan, et al. Soil and water conservation measures reduce erosion but result in carbon and nitrogen accumulation of red soil in southern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023,346:108346.
- [42] Xu Lei, Xing Xiangyu, Cui Hongbiao, et al. The combination of lime and plant species effects on trace metals (copper and cadmium) in soil exchangeable fractions and runoff in the red soil region of China [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021,9:638324.
- [43] 周力,冯建铭,应瑞瑶,等.农户精准施肥两阶段异质性及采纳行为研究:基于劳动偏向型特征的再考察[J]. *农业技术经济*,2021(8):81-91.
- Zhou Li, Feng Jianming, Ying Ruiyao, et al. Two stages of precision fertilization and farmers' adoption: Re-examination of labor-intensive characteristics [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021(8):81-91.
- [44] 白博文,刘善江,申俊峰,等.土壤调理剂研发及应用研究进展[J]. *安徽农业科学*,2021,49(3):14-18.
- Bai Bowen, Liu Shanjiang, Shen Junfeng, et al. Research progress on the development and application of soil conditioners [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021,49(3):14-18.
- [45] 陈香,梁林洲,董晓英,等.酸性土壤改良技术领域专利情报分析[J]. *中国土壤与肥料*,2023(5):174-182.
- Chen Xiang, Liang Linzhou, Dong Xiaoying, et al. Patent analysis of acid soil improvement technology [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(5):174-182.
- [46] 王志兵,刘金明,顾翔.纤维和纳米材料改良花岗岩残积土的力学试验及机理研究[J]. *水资源与水工程学报*,2022,33(4):185-191.
- Wang Zhibing, Liu Jinming, Gu Xiang. Mechanical test and mechanism study of granite residual soil modified by fiber and nanomaterials [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022,33(4):185-191.
- [47] 王丽娜,王迪,任翠梅,等.土壤改良剂的应用现状[J]. *中国农学通报*,2024,40(30):84-88.
- Wang Lina, Wang Di, Ren Cuimei, et al. Current application status of soil improvers [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024,40(30):84-88.
- [48] 王平,付战勇,王菲,等.多源煤基固体废物应用于土壤修复的研究进展[J/OL](2024-06-17). *洁净煤技术*, <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JJMS20240614003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Wang Ping, Fu Zhanyong, Wang Fei, et al. Research progress of the application of coal-based solid waste for soil remediation [J/OL] (2024-06-17). *Clean Coal Technology*, <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JJMS20240614003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [49] 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.
- [50] 李嘉奇,郭自春,汪亚及,等.长期施肥对红壤侵蚀坡耕地重金属积累及其有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*,2025,44(4):964-974.
- Li Jiaqi, Guo Zichun, Wang Yaji, et al. Effects of long-term fertilization on heavy metals accumulation and bio-availability in sloping cropland of red soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025,44(4):964-974.
- [51] 李赞,刘迪,范如芹,等.土壤改良剂的研究进展[J]. *江苏农业科学*,2020,48(10):63-69.
- Li Yun, Liu Di, Fan Ruqin, et al. Research progress of soil ameliorants [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020,48(10):63-69.
- [52] 陈洋,张海东,于东升,等.南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响[J]. *农业工程学报*,2020,36(5):150-157.
- Chen Yang, Zhang Haidong, Yu Dongsheng, et al. Effects of vegetation structure types and rainfall patterns on soil and water loss of understory vegetation in red soil areas of south China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(5):150-157.